



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
LUT ENERGIA
SÄHKÖTEKNIikka

DIPLOMITYÖ

SÄHKÖNTUOTANNON PIENJÄNNITEVERKKOON LIITTÄMINEN — MÄÄRÄYKSET JA SÄHKÖTURVALLISUUS

Tarkastajat Professori Jarmo Partanen
 Diplomi-insinööri Tero Kaipia

Tekijä Janne Karppanen

Tiivistelmä

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikka

Janne Karppanen

Sähköntuotannon pienjänniteverkkoon liittäminen – määräykset ja sähköturvallisuus

Diplomityö

2012

123 sivua, 34 kuvaa, 9 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Professori Jarmo Partanen ja DI Tero Kaipia

Avainsanat: sähkön pientuotanto, mikrotuotanto, pienjänniteverkko, sähköturvallisuus, verkkoon liittäminen, standardointi

Älykkäiden sähköverkkojen (Smart Grid) avulla pyritään vastaamaan sähkönkäytön tehostamisvaatimuksiin. Pientuotanto on yksi tärkeimmistä älykkäiden sähköverkkojen osatekijöistä. Suomessa yksityishenkilöiden innostus omaan sähköntuotantoon ei ole vielä virinnyt, monista eri tekijöistä johtuen. Tulevaisuuden sähköverkoissa pientuotannon rooli on kuitenkin merkittävä. Diplomityössä tarkastellaan pientuotannon yleistymisen edellytyksiä ja tuotannon pienjänniteverkkoon liittämistä. Pientuotannon potentiaalia tarkastellaan eri tuotantomuotojen ja niiden kannattavuuden näkökulmasta. Työn tärkein osuus keskittyy verkkoonliittämismääräyksiin ja sähköturvallisuuteen. Pienjänniteverkkoon liitetty tuotantolaitos on uusi syöttöpiste verkossa ja aiheuttaa esimerkiksi suojausasteita. Lisäksi aihepiiri on vielä uusi ja toimintamenetelmät ovat osin vaillinaisia. Työssä esitetään tärkeimmät haasteet, pohditaan niiden merkittävyyttä ja käydään läpi ratkaisuvaihtoehtoja. Selviä teknisiä esteitä pientuotannon yleistymiselle ei Suomessa ole.

Abstract

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Electrical Engineering

Janne Karppanen

Connecting power generation to the low-voltage network – regulations and electrical safety

Master's thesis

2012

123 pages, 34 pictures, 9 tables and 7 appendixes

Examiners: Professor Jarmo Partanen and M.Sc. Tero Kaipia

Keywords: small-scale generation, microgeneration, low-voltage network, electrical safety, interconnection, standardization

Smart grids aim at the more efficient use of electricity. Small-scale generation is one of the most important elements of Smart Grids. However, for several reasons, interest in producing electricity has not yet arisen among customers in Finland. Nevertheless, the role of small-scale generation will be significant in the future network. This thesis investigates the requirements for the adoption of small-scale generation and its connection to the low-voltage network. The potential and profitability of different forms of small-scale generation are introduced. The focus of this thesis is on the regulations and electrical safety of the interconnection. At the low-voltage distribution level, generation shows as a new feeding point and causes for instance challenges in the network protection. Furthermore, the subject is still new and the procedures are incomplete in Finland. In this study, the most significant challenges related to small-scale generation, their importance and possible solutions are discussed. There are no obvious technical obstacles for small-scale generation to become more common also in Finland.

Alkusanat

Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston LUT Energian laitoksen sähkömarkkinalaboratoriolle. Työ tehtiin syksyn 2011 ja kevään 2012 aikana osana laajempaa Smart Grids and Energy Markets (SGEM)- tutkimushanketta.

Haluan kiittää työn tarkastajaa, professori Jarmo Partasta mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta diplomityöaiheesta, työhön liittyvistä kommentteista sekä laadukkaasta opetuksesta opintojeni aikana. Toista tarkastajaa, diplomi-insinööri Tero Kaipiaa haluan kiittää niistä lukuisista arvokkaista neuvoista, kommentteista ja käytännön näkökulmista, joita olen työtä tehdessäni saanut. Kiitokset myös muille työtä kommentoineille. Jokaisesta keskustelusta on ollut hyötyä.

Vanhemmilleni kiitos siitä, että olen ylipäättään päässyt tähän asti. Kiitokset opintojen aikaisesta kannustuksesta myös muulle lähipiirilleni Kiteellä.

Opiskelu Lappeenrannassa on ollut hienoa aikaa. Jostain syystä hymyilyttää, kun käy miettimään, mitä vuosiin mahtuukaan. Kiitokset näistä unohtumattomista opiskeluvuosista ystäväilleni.

Lopuksi, rakkaimmat kiitokset Niinalle ymmärryksestä opiskelujeni ja erityisesti diplomityön tekemisen aikana.

Lappeenrannassa 25.4.2012

Janne Karppanen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	1
Abstract	2
Alkusanat.....	3
Sisällysluettelo	4
1 Johdanto.....	11
1.1 Työn tavoitteet ja sisältö.....	12
2 Pientuotanto ja mikrotuotanto	14
2.1 Tuotantolaitosten luokittelu	14
2.2 Hajautetut energiaresurssit.....	19
2.3 Sähkön pientuotannon tuotantotapoja.....	21
2.3.1 Tuulivoima	21
2.3.2 Aurinkovoima.....	22
2.3.3 Vesivoima.....	24
2.3.4 Biovoima	25
2.3.5 Pien-CHP.....	26
2.3.6 Varavoimakoneet	27
2.4 Pientuotannon ja mikrotuotannon yhteenveto	28
3 Pientuotannon hyödyntämispotentiaali ja tulevaisuuden näkymät	30
3.1 Kannusteita pientuotannolle.....	30
3.2 Pientuotannon nykytila Suomessa.....	31
3.3 Pientuotannon tilanne Euroopassa.....	34
3.4 Tulevaisuuden näkymät.....	37
3.4.1 Älykkäät sähköverkot.....	41
3.4.2 Sähkömarkkinanäkökulma	43
3.5 Yhteenveto pientuotannon nykytilanteesta	45
4 Tuotannon verkkoon liittäminen.....	46
4.1 Vaatimukset verkkoon liitettävältä tuotantolaitteistolta.....	46
4.1.1 Sähkötyöturvallisuus	50

4.1.2	Sähkön laatu	50
4.1.3	Tuotantolaitoksen suojaus	53
4.1.4	Saarekekäytön esto.....	55
4.1.5	Voimalaitosten säätö	56
4.1.6	Mittaus.....	58
4.2	Liittämistekniikat	59
4.3	Verkkovaihtosuuntaajan ominaisuudet ja tekniikka	61
4.3.1	Verkkovaihtosuuntaajan tekniikka.....	61
4.3.2	Vikatilanteisiin osallistuminen.....	63
4.3.3	Vaikutus sähkön laatuun ja verkon tukeminen.....	65
4.4	Osapuolet.....	67
4.4.1	Sähkön käyttäjä.....	67
4.4.2	Verkkoyhtiö.....	67
4.4.3	Sähkökauppias	68
4.4.4	Tulevaisuuden osapuolia	68
4.5	Haasteita	69
4.5.1	Sähköturvallisuus ja verkkotekniset asiat	70
4.5.2	Verkon suunnittelu ja käyttö.....	71
4.5.3	Taloudelliset ja poliittiset	71
5	Suojaus ja sähköturvallisuus	73
5.1	PJ-verkon rakenne.....	73
5.1.1	Suojaukselta vaadittavat ominaisuudet.....	75
5.1.2	Suojaustekniikka.....	76
5.2	Pientuotannon vaikutus suojauksen toimintaan.....	78
5.2.1	Suojauksen sokaistuminen.....	82
5.2.2	Viereisellä lähdöllä tapahtuva vika	85
5.2.3	Vianaikainen syöttö.....	88
5.2.4	Turha irtoaminen.....	89
5.3	Pientuotannon aiheuttamat riskit ihmisille.....	89
5.3.1	Sähkön käyttäjät.....	89
5.3.2	Sähkötyöhenkilöstö.....	90
5.3.3	Luvattomat tuotantolaitokset	90

6	Pientuotannon liittämisen prosessin arviointi.....	92
6.1	Pientuotannon liittämisesimerkit.....	92
6.1.1	Optimistinen esimerkki	92
6.1.2	Pessimistinen esimerkki	92
6.2	Verkkoyhtiön näkökulma	93
6.3	Asiakkaan näkökulma	96
6.4	Liittämisen prosessissa käytettävät standardit	98
6.4.1	Suomessa käytettävät standardit	98
6.4.2	Saksassa käytettävät standardit	100
6.4.3	Suomalaisen ja saksalaisten standardien vertailu	101
6.4.4	Johtopäätös standardin sovellettavuudesta.....	104
6.5	Kehittämissuhteita liittämisen prosessiin.....	104
7	Johtopäätökset	106
8	Yhteenveto.....	108
	Lähteet.....	110

Liitteet	I	Uusiutuvien energialähteiden (RES) käyttö Euroopassa
	II	RES-E hyödyntämisenaste EU-maissa vuonna 2008
	III	SFS-EN 50160 kooste
	IV	Kahvasulakkeiden sulamiskäyrästä
	V	Muuntopiirin laskentalistaus
	VI	Laskentaesimerkki pienimmästä 1v-oikosulkuvirrasta
	VII	Pientuotannon tilanne Suomessa

Lyhenteet ja symbolit

AMCMK	Alumiinijohtiminen, PVC-eristeinen maakaapeli
AMKA	Pienjänniteriippukierrekaapeli
AMR	Automatic Meter Reading, automaattinen mittarinluenta
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization, Eurooppalainen sähköalan standardoimisjärjestö
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
CP	Coupling Point, liittymispiste
DER	Distributed Energy Resource, hajautettu energiasurssi
DG	Distributed Generation, hajautettu tuotanto
DIN	Deutsches Institut für Normung, saksalainen standardointi- instituutti
DSO	Distribution System Operator, jakeluverkon haltija
Dyn	Muuntajan kytkentäryhmä, kolmio-tähti, maadoitettu tähtipiste
EK	Elinkeinoelämän keskusliitto
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yht. sopivuus
EMV	Energiamarkkinavirasto
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Elec- tricity, kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöelin
ET	Energiateollisuus ry
EU	Euroopan unioni
G, Gen	Generaattori
gG	Ylivirta- ja oikosulkusuojana toimiva varoke
IAEA	International Atomic Energy Agency, Kansainvälinen atomienergiajärjestö
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardoimisjärjestö
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, tehotransistori
INCA	Interactive Customer Gateway, interaktiivinen asiakasrajapinta
Jm	Jakelumuuntaja
KJ	Keskijännite

KTM	Kauppa- ja teollisuusministeriö
LE	Liittymisehto
LoM	Loss of Mains, saarekekäyttö
LVDC	Low Voltage Direct Current, pienjännitteinen tasasähkö
NDZ	Non-Detection Zone, suojauksen katvealue
NLF	New Legislative Framework, lainsäädäntöpuite
PEM	Proton Exchange Membrane, Polymeerielektrolyyttimembraani- polttokenno
PEN	Johdin, jossa yhdistetty maa ja suojava
PJ	Pienjännite
PJK	Pikajälleenkytkentä
PLC	Power Line Communication, datasähkö
PPM	Power Park Module, tuotantoyksikkö
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulointi
RES	Renewable Energy Source, uusiutuva energialähde
RES-E	RES-Electricity, uusiutuvalla energialla tuotettu sähkö
ROCOF	Rate of Change of Frequency, taajuuden muutosnopeus
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno
SFS	Suomen Standardoimisliitto SFS ry
SG	Smart Grid, älykäs sähköverkko
SJ	Suurjännite
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
THD	Total Harmonic Distortion, kokonaisharmoninen särö
TLE	Tuotannon liittymisehto
TN-C	Maadoitusjärjestelmä, yhdistetty suoja- ja nollajohdin, tähtipiste- maadoitettu
TSO	Transmission System Operator, kantaverkkoyhtiö
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
TVPE	Tuotannon verkkopalveluehto
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, saksalainen standardoimisjärjestö
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

VPE	Verkkopalveluehto
VPP	Virtual Power Plant, virtuaalivoimalaitos
VTJ	Verkkotietojärjestelmä
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
VVS	Verkkovaihtosuuntaaja
YSE	Yksinsyötön esto, sama kuin LoM-esto
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

C	kapasitanssi
f	taajuus
I	virta
L	induktanssi
l	pituus
P	pätöteho
Q	loisteho
R	resistanssi
r	resistanssi (p.u.)
S	näennäisteho
T	lämpötila
U	jännite
X	reaktanssi
x	reaktanssi (p.u.)
Z	impedanssi
z	impedanssi (p.u.)

Alaindeksit

f	vika
G, Grid	verkko
g	generaattori
ind	induktiivinen
j	johto/johdin

jg	generaattorin johto-osuus
jm	jakelumuuntaja
jjm	jakelumuuntajan johto-osuus
j0	vaihejohtimen nolla-
j0g	generaattorin johto-osuuden vaihejohtimen nolla-
j0jm	jakelumuuntajan johto-osuuden vaihejohtimen nolla-
K, k	oikosulku
kap	kapasitiivinen
k1v	yksivaiheinen oikosulku
M	momentary, hetkellinen
m	muuntaja
max	maksimi-
N, n	nimellis-
ng	generaattorin nimellis-
P	peak, huippu-
R	kolmivaihejärjestelmän vaihe
rms	root-mean-square, tehollisarvo
S	kolmivaihejärjestelmän vaihe, kulma vaiheeseen R nähden 120°
sv	syöttävä verkko
T	kolmivaihejärjestelmän vaihe, kulma vaiheeseen R nähden 240°
v	vaihe
vvs	verkkovaihtosuuntaaja
0	nolla-
0g	generaattorin nollaparametri
0j	nollajohdin
0jg	generaattorin johto-osuuden nollajohdin
0jm	jakelumuuntajan nollaparametri
0jjm	jakelumuuntajan johto-osuuden nollajohdin
1	myötä-
1v	1-vaiheinen
2	vasta-
3v	3-vaiheinen

1 Johdanto

Tähän asti sähköntuotanto on ollut pääosin keskitettyä ja tuotettu energia on siirretty tuotantolaitoksista siirto- ja jakeluverkkojen kautta sähkön loppukäyttäjille. Tehon virtaussuunta on ollut kohti asiakasta. Mittakaavaedun vuoksi sähköä on kannattanut tuottaa suurissa voimalaitoksissa. Ympäristöarvojen, EU:n tavoitteiden ja sitoumuksien myötä myös sähköverkkoliiketoimintaan kohdistuu muutospainetta. Lisäksi, sähköverkot on rakennettu pääosin 60-70-luvulla ja käyttöikänsä lopussa olevat verkon vaativat uusimista. Kehitystrendi on entistä enemmän kohti sähköriippuvaista yhteiskuntaa.

Älykkäät sähköverkot ovat keino tehostaa sähkönkäyttöä ja mahdollistaa uusia palveluita sähkön käyttäjille. Nyt meneillään oleva AMR-mittarointi on yksi suurimpia uudistuksia, kun tarkastellaan sähköverkkoliiketoiminnan historiaa. Se on myös käytännössä ensimmäinen isompi askel älyverkkojen suuntaan. Tehon syöttösuunta on edelleen asiakasta kohti, mutta lisänä on yksi älykäs piste, etäluetettava mittari, joka on tärkeä solmupiste tulevaisuudessa.

Tärkeässä osassa älykkäitä sähköverkkoja ovat myös asiakaspisteeseen liitettävät pientuotantolaitteistot. Pienet, lähellä kulutuspiistettä olevat sähköntuotantolaitteistot ovat EU:n energia- ja ilmastopoliittisten tavoitteiden saavuttamiseksi tärkeässä asemassa. Asiakaspisteeseen liitettävästä pientuotannosta ei välttämättä ole kattamaan kaikkea kulutusta kaikkina aikoina, joten liityntä sähköverkkoon on säilyttävä.

Oma sähköntuotanto voi toisinaan olla suurempi kuin kulutus ja ylijäämä sähköä olisi mielekästä syöttää verkkoon. Näin asennettu tuotantokapasiteetti saataisiin tehokkaasti hyötykäyttöön. Tällöin tilanne kuitenkin muuttuu hankalammaksi. Verkkoyhtiöillä on velvollisuus liittää ehdot täyttävä tuotantolaitos verkkoon, mutta sähkömarkkinalain mukaan verkkoon syötetylle sähkölle on oltava ostaja (Sähkömarkkinalaki 1995). Lisäksi pienjänniteverkkojen suojaus on suunniteltu lähtökohtaisesti siten, että vikavirrat tulevat syöttävästä keskijänniteverkosta

päin. Verkon loppupäähän liitettävä tuotanto tarkoittaa suurta muutosta niin teknisesti kuin sähkömarkkinanäkökulmastakin.

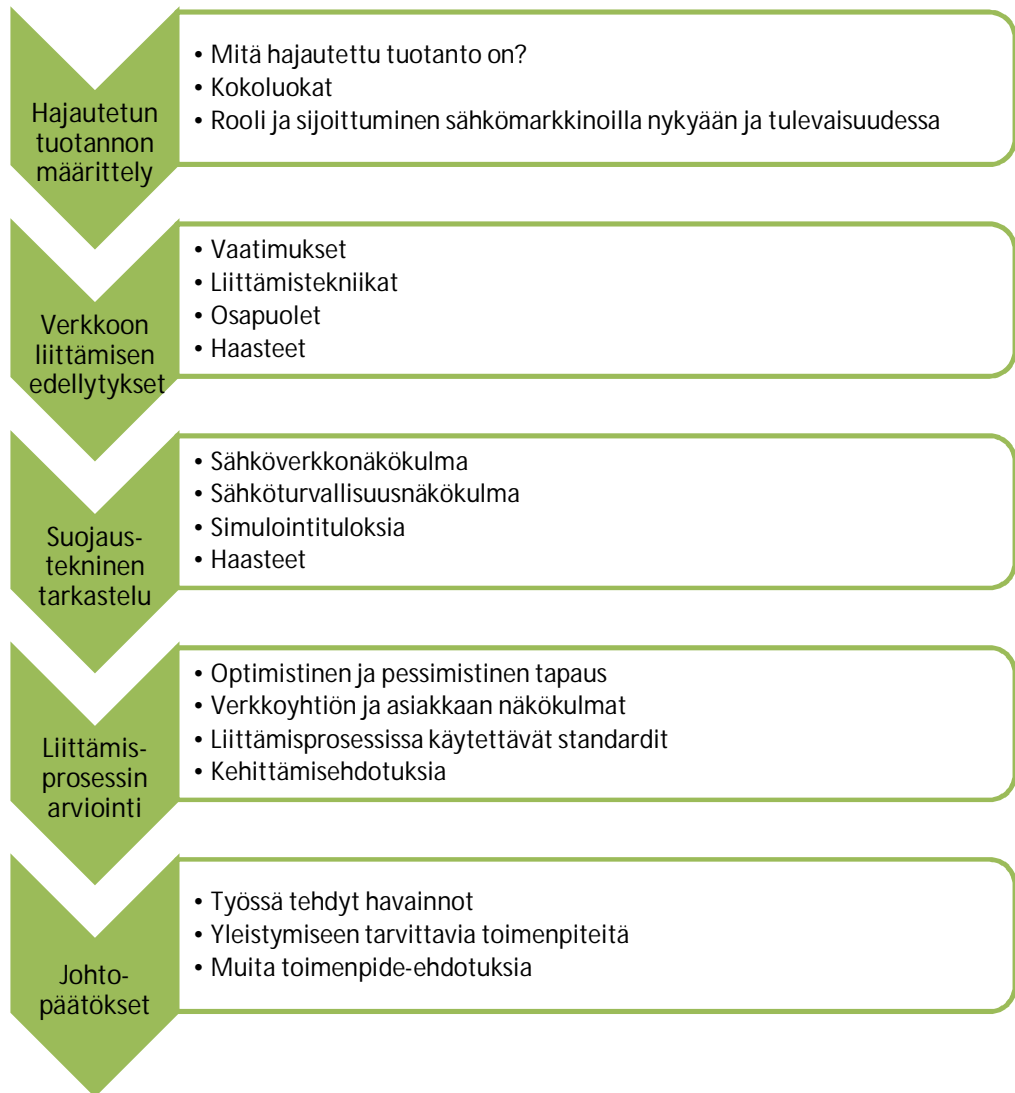
Mikäli pientuotannon halutaan yleistyvän, ovat yksityisasiakkaat potentiaalinen kohderyhmä. Yksityisasiakkaat eivät kuitenkaan halua lähteä pioneerihenkisesti toteuttamaan hankalia tai teknis-taloudellisesti epävarmoja investointeja. Euroopassa ja erityisesti Saksassa pientuotanto on lisääntynyt lyhyen ajan sisällä merkittävästi, toisaalta selkeiden toimintamallien ja toisaalta taloudellisten tukkeinojen vuoksi. Poliittisten signaalien ja lainsäädännön avulla on mahdollista osoittaa ihmisille haluttua kehityssuuntaa. Pientuotantolaitoksen hankkiminen tulisi olla kohtuuhintaista, kohtuullisella takaisinmaksuajalla ja laitteiston tulisi olla riittävän yksinkertainen hallinnan ja käyttöönoton suhteen, jotta pientuotanto yleistyisi nopeammin. Lisäksi tarvitaan selkeät toimintasäännöt. Kun asiakkaan näkökulman lisäksi otetaan huomioon verkkoyhtiön näkökulma ja sähkökauppi-
aan näkökulma, havaitaan, että toimintaympäristöön liittyy vielä epävarmuustekijöitä.

1.1 Työn tavoitteet ja sisältö

Pienjänniteverkkoihin (PJ-verkko) liitettävästä tuotannosta löytyy vähän tutkimustuloksia, mikä todetaan myös Kumpulaisen ja Ristolaisen projektiraportissa (Kumpulainen & Ristolainen 2006). Erityisesti simulointituloksia on hyvin niukasti saatavilla. PJ-verkkojen merkitys kuitenkin korostuu tulevaisuudessa sillä merkittävä pientuotantopotentiaali, eli nykyiset sähkönkäyttäjät, ovat liittyneenä PJ-verkkoon.

Diplomityön tavoitteena on tutkia millä edellytyksillä pienjänniteverkkoon voidaan liittää tuotantoa, erityisesti määräysten ja sähköturvallisuuden kannalta. Diplomityössä laaditaan simulointimalli, jolla voidaan tarkastella esimerkitapauksia. Lisäksi työssä vertaillaan muualla Euroopassa, erityisesti Saksassa, hyväksi havaittuja käytäntöjä ja tarkastellaan millä toimilla pientuotantolaitteiston verkkoon liittäminen olisi mahdollista sekä kannattavaa myös Suomessa laajemmassa mittakaavassa. Pientuotannon yleistymistä hankaloittavat merkittä-

vimmät haasteet ja ratkaisuvaihtoehdot pyritään tuomaan esille. Kuvassa 1.1 on esitetty työn etenemisrakenne ja oleellinen sisältö.



Kuva 1.1 Työn etenemisrakenne ja sisällön pääkohdat.

Työn kaksi ensimmäistä lukua pohjustavat hajautetun tuotannon aihepiiriin, erityisesti taustoihin ja tuotantomuotoihin. Kolmas luku jatkaa saman aihepiirin käsittelyä hyödynnettävyyden ja tulevaisuuden näkymien kannalta. Neljännessä kappaleessa käydään läpi tuotannon verkkoon liittämisen edellytyksiä. Viidennessä luvussa tarkastellaan pientuotannon vaikutuksia verkon suojaukseen ja sähköturvallisuuteen. Kappaleessa kuusi arvioidaan pientuotannon liittämisprosessia nykyisellään. Seitsemännessä luvussa on esitetty työn johtopäätökset ja kahdeksas luku on yhteenveto.

2 Pientuotanto ja mikrotuotanto

Johdannossa käsiteltiin lyhyesti hajautetun tuotannon taustoja ja syitä sille, miksi siitä puhutaan. Seuraava luonteva kysymys on, *millaisia mahdollisuuksia on sähkön pientuotantoon?* Kysymyksen voi ymmärtää ainakin kahdella eri tavalla:

- a) voimalaitoksen osalta tuotantomuodon/käyttövoiman ja teholuokan pohjalta, tai
- b) ns. ympäröivän maailman pohjalta (nykytila ja näkymät).

Pääluvut kaksi ja kolme pyrkivät vastaamaan näihin kysymyksiin. Tässä luvussa käydään läpi a)-kohdan kysymystä. Luvun jälkeen tulisi olla selvyys siitä mitä pientuotanto on ja millä tavoin sähköä voi tuottaa pienessä mittakaavassa. Ensimmäisessä alaluvussa tehdään pientuotantolaitosten luokittelu työn loppuosia varten.

2.1 Tuotantolaitosten luokittelu

Kirjallisuudessa hajautetusta tuotannosta puhutaan varsin kirjavasti termeillä *hajautettu tuotanto, pientuotanto, mikrotuotanto, pienimuotoinen tuotanto* jne., eikä selvää määrittelyä ole olemassa. Hajautettu tuotanto ei käsitteenä ole yksiselitteinen, koska liityntä voi olla pienjännite-, keskijännite- (KJ), tai suurjänniteverkkoon (SJ) ja tehot voivat vaihdella kilowatista megawattiin. Tällöin ei ole selvää näkemystä siitä, puhutaanko muutaman kilowatin aurinkopaneeleista talon katolla vai sata metriä korkeasta tuuliturbiinista rannikolla. Hajautettu tuotanto on keskitettyyn tuotantoon verrattuna lähempänä kulutusta olevaa tuotantoa. Koska tässä työssä mielenkiinnon kohteena on PJ-verkkoihin liittyvä sähköntuotanto, pyritään sen sijoittuminen selvittämään suhteessa hajautettuun tuotantoon.

Luokittelun pohjana näkee käytettävän verkkoliittynän jännitetasoa tai tuotantoyksikön nimellistehoa. Tässä yhteydessä pyritään yhdistämään luokittelut kokonaisuudeksi, jotta jatkossa olisi näkemys siitä, minkä kokoluokan tuotannosta on kysymys ja missä jännitetasossa on verkkoliityntäpiste. Sähkömarkkina-alaista

saadaan yksi tehoraja, 2 MVA, jota pienempiä tuotantolaitoksia tai useamman tuotantolaitoksen kokonaisuuksia kutsutaan pienimuotoiseksi tuotannoksi (Sähkömarkkinalaki 1995). Toisesta ääripäästä löytyy mikrotuotanto, joka on nimensä mukaisesti hyvin pientä tuotantoa. Ensisijaisesti sen tarkoitus on tuottaa sähköä omaan käyttöön, eli tuotanto voi olla yksi- tai kolmivaiheista (230/400 V). Mikäli käytetään 16 A sulaketta yksivaiheisen tuotannon rajana, päästään teholtaan noin 3,7 kVA:n tuotantoon ja kolmivaiheisena 3x16 A sulakkeilla 11 kVA:n tuotantoon. Standardin SFS-EN 50438 Suomea koskevassa lisäyksessä mikrotuotannon määritellään ulottuvan 30 kVA:iin, joten siltä osin tilanne on selkeä (SFS-EN 50438).

Väli 30 kVA:sta 2 MVA:iin on suuri ja siihen voi sisältyä monenlaisia tuotantolaitoksia, joten on perusteltua jakaa kahden edellä määritellyn, pienimuotoisen tuotannon (< 2 MVA) ja mikrotuotannon (< 30 kVA) väli vielä kahtia. Aihepiiriä lukiessa törmää usein myös 1 MVA:n rajaan. Esimerkiksi EMV:n voimalaitosrekisterissä rajana on 1 MVA, jota pienempiä ei ole tilastoitu (Lehto 2009). Sähkömarkkinaviranomaiset haluavat tiedon tuotantomuodosta riippumatta yli 1 MVA:n tuotannon liittämistä, tehonkorotuksista ja tuotannon poistamisesta (Lehto 2009). Kuitenkin 1 MVA:n raja pientuotannoksi on korkea.

Jos tarkastellaan pientuotantomuotoja, aurinkosähköjärjestelmiä tai tuulivoimaloita siinä kokoluokassa, joka tämän työn kannalta on mielenkiintoinen, on 100 kVA:n raja perustellumpi, kuin megawatti-luokan laitteet. Useissa lähteissä PJ-verkkoon liittyvän tuotannon rajana on pidetty juuri 100 kVA:a (Kuisma & Kurtakko 2008; Lemström 2006; Pöyry Energy Oy 2006; Farin et al. 2009; Sikanen et al. 2006; Oulun Energia 2011). Raja ei tietenkään ole absoluuttinen sillä mainintoja myös 200:sta ja 300 kVA:sta löytyy, riippuen mm. tuotantomuodosta. PJ-verkkoon voidaan liittää esimerkiksi 200 kVA:a tuotantoa, varsinkin jos liityntä on suoraan muuntopiiriin. Määrittelyn heikkoutena on teholuokkaan perustuva raja, kun tässä tapauksessa rajana on liityntäpiste eli PJ-verkko. Olipa raja 100 kVA tai 200 kVA, löytyy Suomesta varmasti kohteita, jossa rajan yli päästään vaikka liityntä olisikin PJ-verkkoon. Täysin aukottoman rajan muodostami-

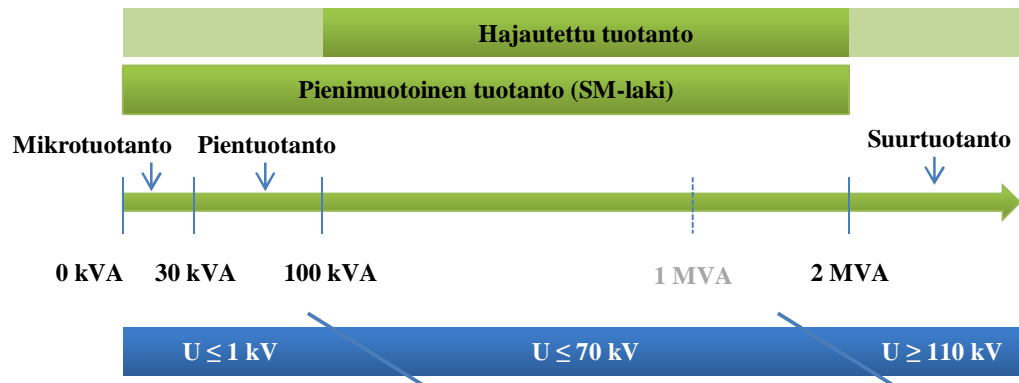
nen on siksi tässä tapauksessa mahdotonta. ET:n ohjeessa (ohje verkon suunnittelijoille tuotannon liittämistä) on sanottu, että verkkoyhtiöiden kannattaa määrittellä liittymisperiaatteisiin yhtiönkohtainen raja (ET 2011c).

Edellä esitetyn pohdinnan perusteella on laadittu seuraavanlainen lajittelu:

- Keskitettyä tuotantoa on kaikki suoraan kantaverkkoon (yhteiskäyttöverkko) liittyvä, tai voimalaitosyhtiön oman KJ- verkon kautta kantaverkkoon liittyvä yli 2 MVA:n tuotanto, tuotantotavasta riippumatta.
- Hajautettua suurtuotantoa on kaikki KJ-verkkoon tai paikallisen jakeluverkon haltijan KJ- tai alueverkon avulla yhteen kantaverkon liityntäpisteeseen liittyvä yli 2 MVA:n tuotanto.
- Hajautettua tuotantoa on kaikki KJ- tai PJ-verkkoon liittyvä yli 100 kVA:n, mutta alle 2 MVA:n tuotanto tai tuotantolaitoskokonaisuus, riippumatta tuotantolaitosten lukumäärästä tai yksittäisen yksikön nimellistehosta.
- (Hajautettua) pientuotantoa on kaikki PJ-verkkoon liittyvä alle 100 kVA:n, mutta yli 30 kVA:n tuotanto tai tuotantolaitoskokonaisuus, riippumatta tuotantolaitosten lukumäärästä tai yksittäisen yksikön nimellistehosta.
- (Hajautettua) mikrotuotantoa on kaikki pienjänniteverkkoon liittyvä alle 30 kVA:n tuotanto.

Listassa mainittu hajautettu suurtuotanto lienee käsitteenä erikoisin. Perusvoimaa ajavista laitoksista on kuitenkin puhuttu keskitettynä suurtuotantona. Lisäksi *hajautettu suurtuotanto* rajaa pois keskitetyt voimalaitokset ja toisaalta myös pienemmät hajautetun tuotannon yksiköt. Myös verkkoliityntäpisteen kannalta luokittelu pienjänniteverkko/pientuotanto ja suurjänniteverkko/suurtuotanto on looginen. Käytetään siis tässä työssä *hajautettua suurtuotantoa*, mikäli kyseisen kokoluokan tuotannosta on jossain yhteydessä tarpeellista puhua.

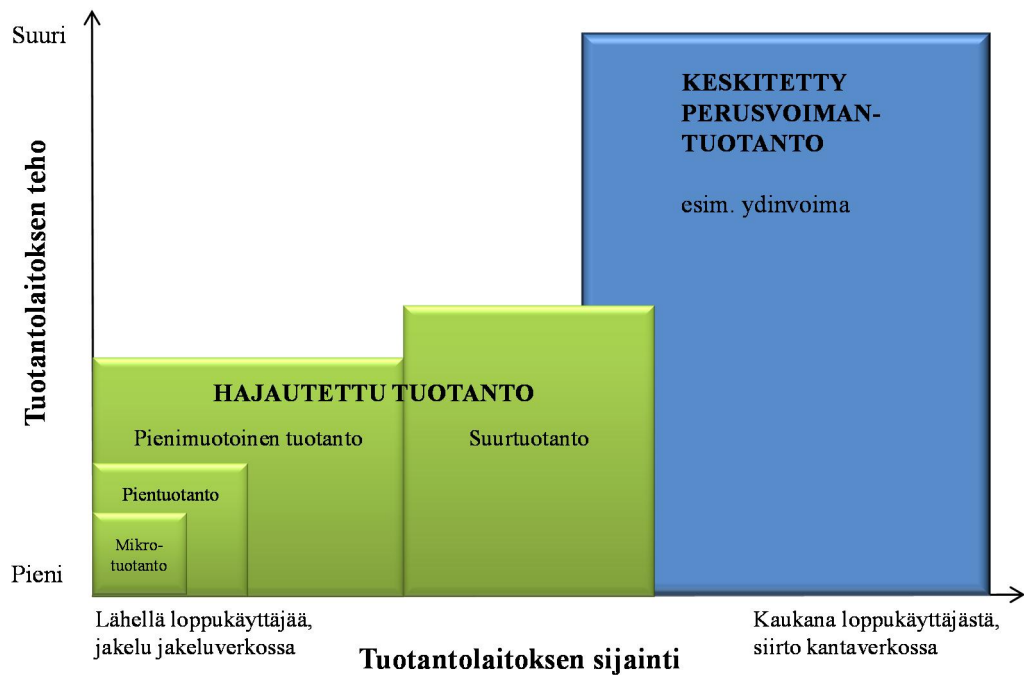
Tehtyä luokittelua pyrkii selventämään alla oleva kuva 2.1, jossa on esitetty lajittelu tuotantolaitoksen tehon mukaan. Kuvan selkeyttämiseksi janalla olevat tehot eivät ole mittakaavassa janan pituuteen nähden tai keskinäisen sijainnin suhteen.



Kuva 2.1. Hajautetun tuotannon määrittely kokoluokan ja jännitetason mukaan.

Pienimuotoinen tuotanto tulee siis sähkömarkkinaalaista, joten se kattaa kaiken alle 2 MVA:n tuotannon (Sähkömarkkinalaki 1995). Tässä työstä hajautetusta tuotannosta puhuttaessa tarkoitetaan kuvassa näkyvää aluetta 100 kVA-2 MVA, joka kieltämättä on pitkä. Pien- ja mikrotuotantokin ovat hajautettua tuotantoa, mutta niistä puhuttaessa hajautettuna tuotantona, käytetään termejä *pientuotanto* tai *mikrotuotanto*. Pelkkä hajautettu tuotanto viittaa 100 kVA:n ja 2 MVA:n väliin. Yli 2 MVA:n menevä osuus sisältää keskitetyn tuotannon ja hajautetun suurtuotannon. Ne eivät kuitenkaan kuulu tämän työn kannalta oleelliseen sisältöön.

Jännitetasoihin on hyvin hankala vetää tarkkaa rajaa, sillä liittymispisteen jännitetaso on hyvin tapauskohtainen, riippuen tuotantolaitteiston tehosta, ”luonteesta” ja kyseisen alueen verkosta. Lisäksi liityntäpiste voi olla myös muuntamolla tai sähköasemalla. Tästä johtuen rajanveto on häilyvä 100 kVA:n ja 2 MVA:n ympärillä. Luokittelua pyrkii selkeyttämään vielä alla oleva kuva 2.2, josta käy ilmi tehty luokittelu.



Kuva 2.2. Hajautettu sähköntuotanto. Kuvassa on yhdistetty yllä tehty luokittelu ja lähteessä (Bergman et al. 2005) esitetty havainnollistus tuotantolaitoksen tehon ja sijainnin riippuvuudesta. (Muokattu lähteestä: Bergman et al. 2005)

Pientuotanto on tässä työssä tärkein kokoluokka. Se siis tarkoittaa PJ-verkkoon liittyvää, alle 100 kVA:n tuotantoa, joka pitää sisällään myös mikrotuotannon (<30 kVA). Molemmat kuuluvat myös sähkömarkkinalain mukaiseen pienimuotoiseen tuotantoon (Sähkömarkkinalaki 1995). Tehdyn luokittelun pohjalta tulisi olla selkeämpi kuva siitä mitä hajautettu tuotanto tässä työssä tarkoittaa ja mitä se voi muussa yhteydessä esiintyessään tarkoittaa.

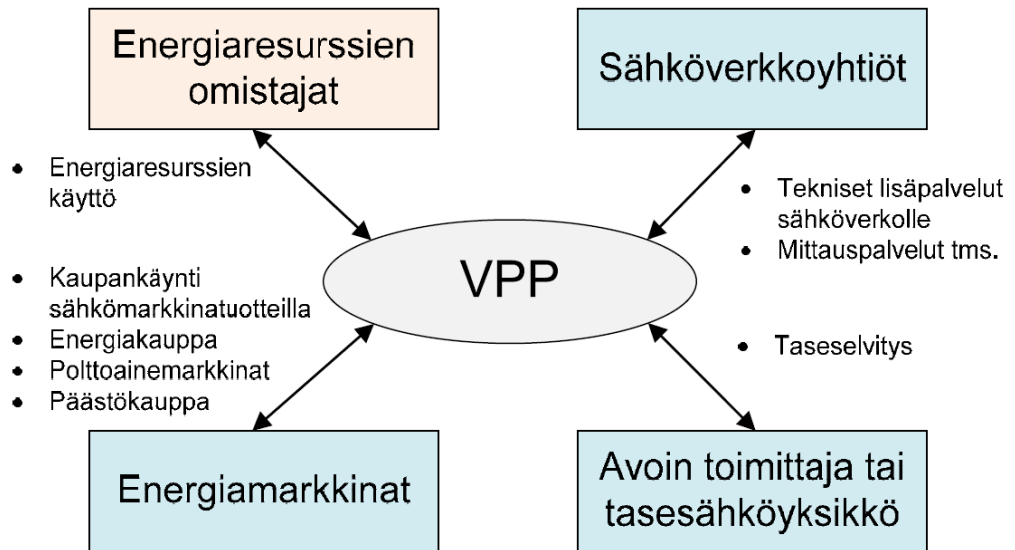
Lisättäköön vielä tarkennukseksi, että tässä työssä *tuotantoyksikkö* tarkoittaa yhtä sähköä tuottavaa kokonaisuutta ja *tuotantolaitos* yhden tai useamman tuotantoyksikön muodostamaa kokonaisuutta. *Asiakkaalla* tarkoitetaan pääasiassa verkko-yhtiön tai sähkönmyyntiyhtiön asiakasta. Asiakkuussuhde voi muodostua myös muiden tahojen, kuten tuotantolaitoksen toimittajan kanssa. Kuitenkin, *asiakkaalla* tarkoitetaan aina samaa henkilöä, joka käytännössä aina on myös *sähkön käyttäjä*.

2.2 Hajautetut energiasurssit

Tässä kappaleessa käsitellään pien- ja mikrotuotantoa osana laajempaa kokonaisuutta. Luvussa noustaan yksi taso ylöspäin ja tarkastellaan, mihin pien- ja mikrotuotanto sijoittuvat laajemmassa mittakaavassa.

Hajautettu energiasurssi (Distributed Energy Resource, DER) on käsitteenä laajempi, kuin pientuotanto. Hajautetut energiasurssit voivat olla tuotantoa tai kuormia. Tuotannon tapauksessa jokin pientuotantolaitos voi olla energiasurssi. Myös ohjattava kuorma voi olla energiasurssi, jonka poiskytkeminen vapauttaa kapasiteettia muuhun käyttöön. Esimerkiksi sähköauton akusto on itsessään energiavarasto, jota voidaan sopivan verkkoliitynnän (verkkovaihtosuuntaajan, VVS) avulla käyttää myös syöttöpisteenä verkkoon päin. Muita (tulevaisuuden) energiasurssseja voivat olla esimerkiksi superkondensaattorit ja vauhtipyörät (”tehovarasto”). Energiarurssin muodostaminen ei ota kantaa energialähteeseen tai tuotantotapaan vaan tuottaa tai vapauttaa sen sijaan jonkun energiakapasiteetin käytettäväksi. (Rautiainen 2008)

Virtuaalivoimalalla (Virtual Power Plant, VPP) tarkoitetaan yllämainittujen hajautettujen energiasurssien kokonaisuutta, jota hallitaan jollakin hallintajärjestelmällä. Virtuaalivoimala tehostaa yksittäisten energiasurssien käyttöä osana kokonaisuutta. Virtuaalivoimala voi myös olla yksi ratkaisu monimutkaistuvien, hajautettuja energiasurssseja sisältävien verkonosien hallintaan. VPP voi mahdollistaa sähkömarkkinoille osallistumisen, mikä yksittäisten, vaihtelevasti käytävissä olevien energiasurssien tapauksessa olisi muuten käytännössä mahdotonta. Aggregaattori on se toimija, joka hallitsee energiasurssien käyttöä ja kaupallista hyödyntämistä (Valtonen et al. 2010). Alla olevassa kuvassa 2.3 on esitetty VPP:hen liittyviä sidosryhmiä. (Rautiainen 2008)



Kuva 2.3. Virtuaalivoimalaan liittyviä sidosryhmiä ja niiden palveluita sekä toimintoja. (Rautiainen 2008)

Kuten kuvasta 2.3 nähdään, virtuaalivoimalaa voidaan tarkastella sekä liiketoiminnallisena että teknillisenä voimalana. Näin ollen, kun VPP itsessään koostuu pienistä resursseista, joihin liittyy niiden hallinta, sähkömarkkinanäkökulma, optimointitehtävät ja lisäksi monet mahdolliset oheispalvelut, on aihepiiri todella laaja eikä siihen oteta tarkemmin kantaa tässä työssä. Aihepiiriä on käsitelty Rautiainen diplomityössä (Rautiainen 2008) ja aggregoinnin osalta diplomityössä (Gulich 2010).

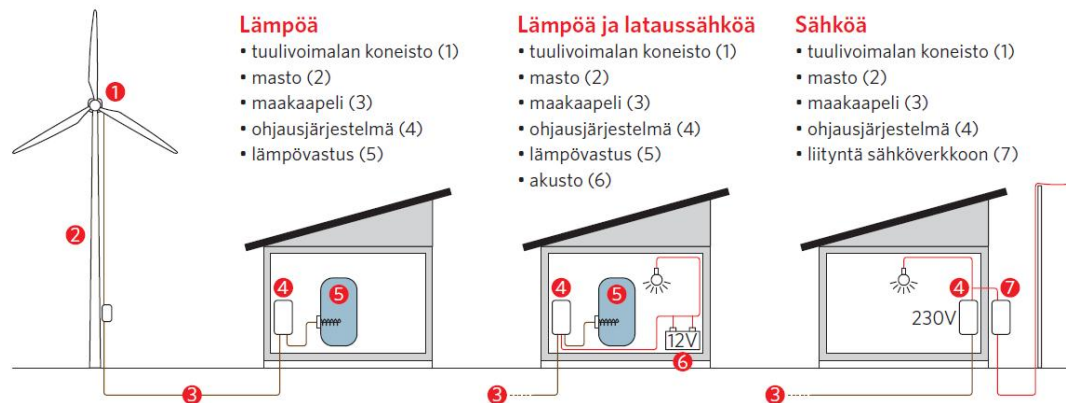
Hajautettu tuotanto on siis osa hajautettuja energiaresursseja. VPP:t voivat kuulua microgridiin. Microgrideillä tarkoitetaan verkon osia, jotka pystyvät esimerkiksi jäämään omaksi saarekkeekseen ja jatkamaan sähkönkäyttöä häiriötilanteessa. Ensiksi kuitenkin tarvitaan muun muassa edellä mainittuja energiaresursseja, esimerkiksi pientuotantoa, jotta tällaisia microgridejä pystyttäisiin muodostamaan. Työssä ei käsitellä microgridejä enempää, mutta diplomityössä (Ihamäki 2012) on paneuduttu aiheeseen. Tässä työssä tutkitaan kuvan 2.3 lohkoista energiaresurssien omistajien energiaresursseja (pientuotantolaitoksia) ja niiden verkoonliittämistä.

2.3 Sähkön pientuotannon tuotantotapoja

Tässä kappaleessa käydään läpi yleisimmät pientuotantomuodot, tarkastellaan kuhunkin tuotantomuotoon liittyviä erikoispiirteitä ja pohditaan niiden merkittävyyttä pientuotantomuotona. Kussakin alaluvussa on tarkasteltu pien- tai mikrokokoluokan tuotantoa tämän työn aihepiirin mukaisesti.

2.3.1 Tuulivoima

Tuulivoima on hajautetun sähkötuotannon muotona merkittävin. Saatava vuotuinen energia riippuu sijoituspaikasta (tuulisuusoloista), tornin korkeudesta ja generaattorin tehosta. Pientuulivoimaloiden tehot liikkuvat yleensä sadoista wateista kahteenkymmeneen kilowattiin. Mainittakoon myös, sekaannuksen välttämiseksi, että alle kymmenen kW:n turbiineita voi nähdä kutsuttavan mikroturbiineiksi. Generaattorina näissä pienemmän kokoluokan laitteissa on useimmiten kestmagneettigeneraattori. Tuotettu energia voidaan syöttää akkuihin, hyödyntää lämmityksessä ja lämminvesivaraajissa tai syöttää suoraan verkkoon invertterin avulla. Alla on havainnollistava kuva pientuulivoimalan käyttötavoista. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry et al. 2010)



Kuva 2.4. Pientuulivoiman käyttötapoja yksityisasiakkaan kiinteistössä. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry et al. 2010)

Tuulivoimaa on käytetty aiemmin käyttökohteissa, joita ei ole liitetty yleiseen jakeluverkkoon. Nykyään asennetut tuulivoimalat ovat yhä enemmän tukevana energiamuotona verkkosähkön ohella eli liityntä sähköverkkoon on olemassa.

Suunta on kohti aktiiviseen verkon tukemiseen osallistumista myös PJ-verkoissa. Tuulivoiman erityispiirteenä on tuotannon nopea vaihtelu, joka hankaloittaa suojauksen suunnittelua ja tuotannon ennustamista sekä vaikuttaa sähkön laatuun.

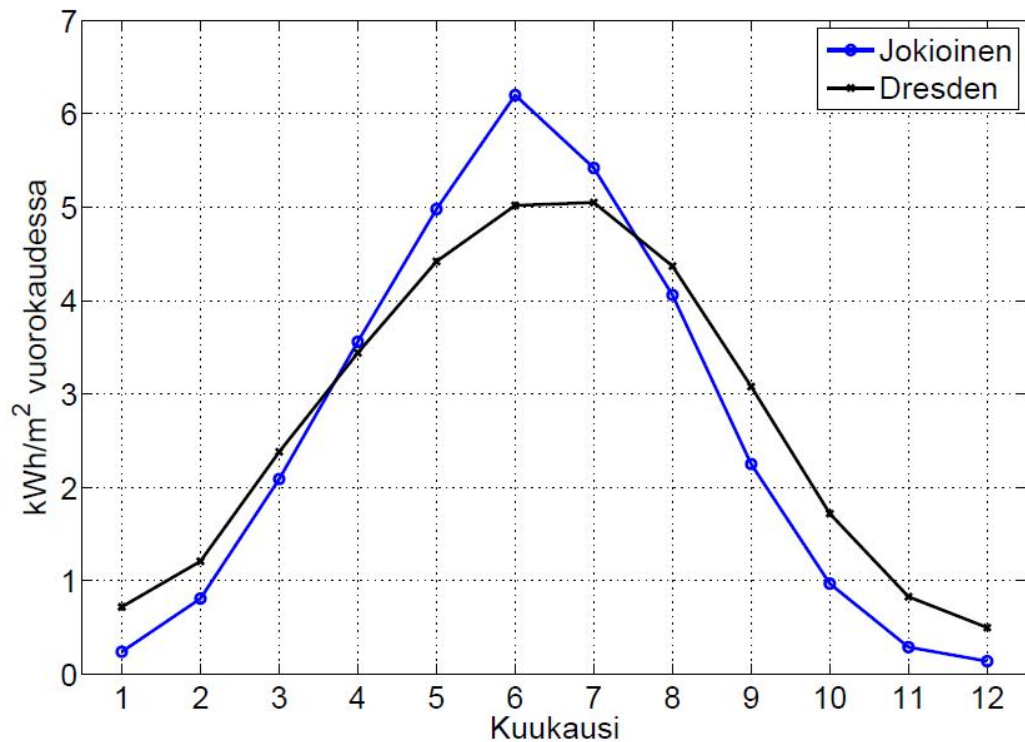
Hollantilaisessa tutkimuksessa on tarkasteltu pienten tuuliturbiinien energiantuottoa useampana vuonna peräkkäin. Tulosten perusteella pientuulivoiman kannattavuus oli huono. Lisäksi kokeessa ilmeni muitakin ongelmia, kuten melua ja turbiinien hajoamisia. (Projectgroep testveld kleine windturbines 2009)

Pientuulivoimaan liittyvät lupa-asiat ovat hankalia Suomessa, koska joissain kunnissa pientuulivoimalaa käsitellään rakennuksena, joissain ei. Näin ollen, pientuulivoimalan hankkijat ovat eriarvoisessa asemassa, riippuen kunnasta. Lainsäädäntö on tässä suhteessa epälooginen. Varmuuden saa kunnan rakennusjärjestyksestä ja rakennusviranomaisilta. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2012)

2.3.2 Aurinkovoima

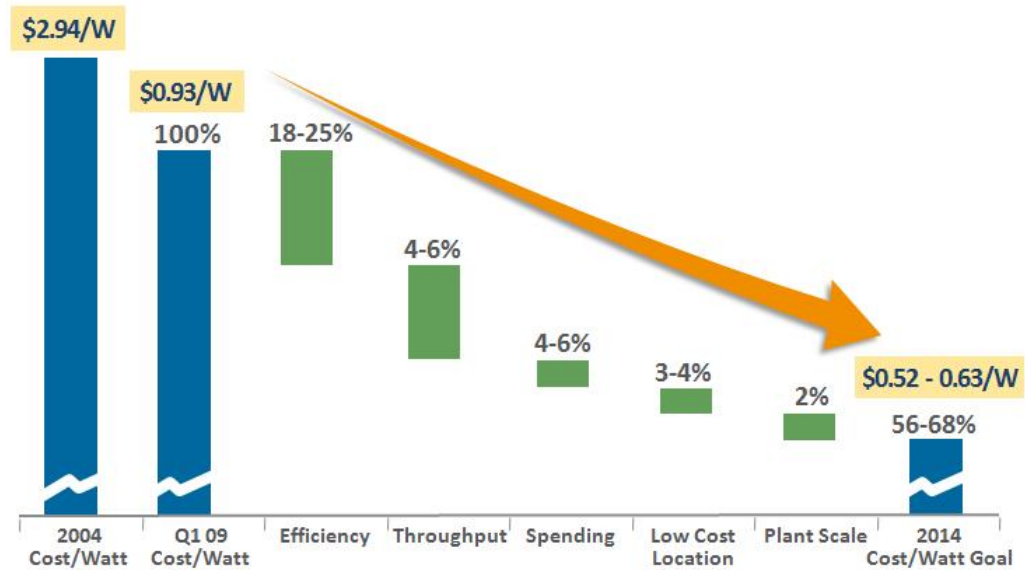
Aurinkopaneelin toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa fotonit irrottaa elektroneja puolijohteesta (yleensä pii). Paneelista saadaan tasavirtaa. Aurinkovoimala koostuu paneelista tai paneeleista, ohjauksesta, mahdollisesta akustosta ja invertteristä. Aurinkovoima on tuulivoiman tavoin luonteeltaan vaihtelevaa ja säätövoimaksi kelpaamatonta.

Aurinkovoiman osuus Suomen pientuotannosta on pieni. Lukumäärällisesti eniten aurinkopaneeleita löytyy tällä hetkellä Suomessa käytöistä, joissa verkkosähköä ei ole saatavilla (mökkit, saaristot, veneet, asuntovaunut ym.). Aurinkovoimaan liittyvä kiinnostus ei ole Suomessa virinnyt samoin kuin esimerkiksi Saksassa tai muissa Euroopan maissa. Suomessakin kuitenkin on potentiaalia aurinkoenergian käyttöön. Alla olevasta kuvasta 2.5 käy ilmi auringon vuotuinen säteilyteho Suomessa ja Saksassa.



Kuva 2.5. Vertailu auringon säteilytehon vaihtelusta vuoden aikana Suomessa ja Saksassa. (Kitunen 2007)

Aurinkosähkön heikkous on siinä, että energia saadaan lyhyemmällä aikavälillä kuin Keski-Euroopassa, eikä sitä ainakaan vielä voida varastoida kylmien talvi-kuukausien varalle, jolloin sähkönkulutus on suurimmillaan. Sähkön kulutus on kuitenkin kasvussa myös kesäaikana jäähdytyskuormien (mm. ilmalämpöpumput) vuoksi. Yksi kilowatti aurinkopaneelitehoa tuottaa aurinkoteknillisen yhdistyksen mukaan optimisuuntauksella noin 900-1000 kWh energiaa vuodessa (Lehto 2009). Paneeli- ja akkuteknologian sekä invertteriteknikan kehittyminen vaikuttavat merkittävästi kannattavuuden kehittymiseen. Alla olevassa kuvassa 2.6 on esitetty paneelien valmistushinnan kehitystä.



Kuva 2.6. Paneelien valmistushinnan kehitys vuodesta 2004 vuoteen 2009 ja arvio tilanteesta vuonna 2014. Kvartaalille Q1/2011 hinnaksi on ilmoitettu 0,75 USD/W, joka on noin neljäsosa vuoden 2004 valmistushinnasta. (1€=0.75USD, 29.11.11). (Mulder 2011)

Hinnat vaihtelevat jonkun verran, mutta akkuineen sadan watin aurinkosähköjärjestelmä maksaa nyt noin 1000 euroa (Eurosolar 2012; Finnwind 2012; Solarshop 2012). Paneeli&vaihtosuuntaja-järjestelmän hinnat ovat noin 2000€/kW_P (TST Photo-Voltaic-Shop 2012).

Aurinkopaneelien asennukseen tarvittava lupa riippuu kunnasta ja alueesta (asema-kaava). Toimenpidelupa ja ilmoitusmenettely ovat yleisimmät menettelytavat, mikäli rakennusjärjestyksestä löytyy suoraan aurinkopaneeleita koskeva informaatio. Näin ei aina ole, jolloin varmuuden saa kunnan rakennusviranomaisilta.

2.3.3 Vesivoima

Vesivoiman tuotannossa veden liike-energia pyörittää turbiinia ja turbiinin akselia, joka edelleen pyörittää generaattoria ja muuntaa veden liike-energian sähköenergiaksi. Valtakunnan verkossa olevat suuremmat vesivoimalaitokset ovat hyviä säätövoiman kannalta, mutta pientuotantolaitoksissa ei yleensä ole merkittäviä säätöjärjestelmiä (Valkonen et al. 2005). Generaattorit ovat useimmiten

epätahtigeneraattoreita, koska ne ovat halpoja ja helpompia tahdistaa verkkoon kuin tahtigeneraattorit (Kinttula 2008). Toisaalta, ne ottavat loistehoa verkosta, jota varten tarvitaan kompensointilaitteisto, koska loistehoa ei kannata siirtää (Kinttula 2008).

Pienemmät voimalaitokset on jaettu tehon mukaan kahteen luokkaan, pienvesivoimalaitoksiin (1-10 MW) ja minivesivoimalaitoksiin (<1 MW). KTM:lle tehdyssä selvityksessä todetaan, että alle 0,5 MW:n minivesivoimalaitosten uudisrakentaminen ei ole kannattavaa. Suojelematonta vesivoimapotentialia olisi pien- ja minikokoluokissa yhteensä 288 MW. Kahden edellä mainitun osuus Suomen vesivoimatehosta on yhteensä 10%. Vesivoimalan kustannuksista merkittävimmän osan muodostavat investointikustannukset. Potentiaalisin tilanne vesivoimalan investointiin olisi vanhan tuotantopaikan, kuten myllyn kunnostaminen, jolloin kannattavuuden alarajaksi muodostuu 100 kW. (PR Vesisuunnittelu Oy 2005)

Voimaantulleen päätöksen mukaan kiinteä sähkön tuotantotuki lakkasi vuoden 2012 alusta. Tuki oli vesivoiman osalta (<1 MW) 4,2 €/MWh ja sitä sai lokaan 2011 alussa noin 10 vesivoimalaa. (Eduskunta 2011)

Tässä yhteydessä ei käsitellä pienvesivoiman tuotantoa tarkemmin, sillä mahdollisuus sen hyödyntämiseen on lukumäärällisesti hyvin rajallisella joukolla, kun tarkastellaan yksityisasiakkaan mahdollisuuksia hankkia itselleen pientuotantolaitos. Lähteessä (Kinttula 2008) on tarkasteltu pienvesivoiman kannattavuutta tarkemmin. Lisäksi vesiluvan hankintaprosessia on käsitelty lähteessä (Pienvesivoimayhdistys 2009).

2.3.4 Biovoima

Biokaasutusvoimalaitoksen energialähteenä toimii biokaasu, jota syntyy mädätyksessä. Biovoiman lähteeksi kelpaavat esimerkiksi eläinten lanta, liete, biojätteet, puupohjaiset polttoaineet ym. sivutuotteet. Useimmiten voimalaitos on kaasuturbiini-generaattori yhdistelmä, jolla voidaan tuottaa myös lämpöä (CHP).

Tällaisia voimalaitoksia löytyy mm. maatiloilta, jolloin polttoainetta saadaan päätoimen ohella. Laitosten teho on kymmenistä kilowateista satoihin kilowatteihin (Lehto 2009). Suomessa ongelmana on kuitenkin suurten (>100 eläintä) karjatilojen vähyys. Saksassa laitoksen omistaja ja käyttäjä on usein joku muu kuin maatilalan omistaja, koska laitoksen käyttö vaatii kaikkienensa paljon perehtymistä. Laitoksen ennustettavuuteen ja käyttöön liittyy myös riski biovoimaproessin epäluotettavuudesta, jos tarkastellaan asiaa verkkoonsyötön kannalta. (Valkonen et al. 2005)

Biomassakattiloissa polttoaineena käytetään erilaisia puupohjaisia polttoaineita, kuten hakkuutähteitä, purua, kutteria, kuorta tai valmistettuja tuotteita kuten pellettejä tai brikettejä (Motiva 2010). Teholuokka vaihtelee kymmenestä kilowattista kymmeneen megawattiin. Huipunkäyttöaika riippuu yksikkökoosta, pienimmässä se on 1000 tuntia ja kaukolämpölaitoksissa jopa 4000 tuntia ja vastaavasti hyötysuhteet koosta riippuen 70-90% välillä. Tuotantokustannus on noin 1-5 c/kWh (huipunkäyttöaika 1000-3500 h ja käyttöikä 20 a). (Vartiainen et al. 2002)

Kuten vesivoimankin osalta, lakimuutos kumoo biovoiman kiinteän sähkön tuotantotuen 4,2 €/MWh, jota lokakuun alussa 2011 oli EMV:n mukaan hakenut yksi biovoimalaitos. (Eduskunta 2011)

Niin tässä, kuin seuraavassakin luvussa käsitellyjä tuotantomuotoja harkittaessa kannattaa suoraan olla yhteydessä rakennusviranomaisiin, koska menettely on ympäristönäkökulmien vuoksi hyvin tapauskohtaista.

2.3.5 *Pien-CHP*

Sähköä voidaan tuottaa myös lämmön ja sähkön yhteistuotantona, jolloin sähköteho vaihtelee välillä 0.5 kW...10 MW. Pien-CHP-tekniikoita ovat mm. kaasuja ja dieselmoottorit, mikroturbiinit, stirling-moottorit, polttokennot ja höyryturbiinit (Vartiainen et al. 2002). Laitoksen koosta ja lämmön hyödyntämisasteesta

riippuen rakennusaste on noin 0.4, hyötysuhteen ollessa parhaimmillaan 85-90% (Valkonen et al. 2005).

Alla olevaan taulukkoon on koottu edellä mainittujen pien-CHP-tuotantomuotojen tärkeimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 2.1. Pien-CHP-tuotantomuotojen tärkeimpiä ominaisuuksia (Vartiainen et al. 2002).

	Yksikköteho (kW)	Sähköhyötysuhde (%)	Lämpöhyötysuhde (%)	Käyttöikä (a)	Huipunpunnkäyttöaika (h)	Investointi (€/kW)	Tuotantokustannus (c/kWh)
Kaasu- ja dieselmoottorit	3-10000	30-45	45-50	15	5000	450-1400	2,5-4
Mikroturbiinit	25-250	15-35	50-60	15	5000	1000-1700	3-4
Stirlingmoottorit	0,5-25	15-35	50-60	15	5000	1400-2200	4-5
Polttokennot	0,5-2000	38-55	30-45	15	5000	2800-4400	5-8
Höyrykoneet ja -turbiinit	0,5-10000	15-35	40-70	15	5000	1500-3000	3-4

Kaasu- ja dieselmoottorit ovat polttomoottorin ja generaattorin yhdistelmiä, jotka sopivat parhaiten tasaisen kuormituksen kohteisiin. Mikroturbiinit soveltuvat niinkään tasaisen kuormituksen kohteisiin, osateholla ajettaessa hyötysuhde heikkenee. Eniten näitä käytetään saatavan höyryn takia teollisuuskohteissa. Stirlingmoottorit ovat soveltuvimpia mikroluokan CHP:n tuotantoon, eli esimerkiksi maataloille, jossa voidaan hyödyntää biopolttoaineita. Polttokennojen polttoaineena on vety ja pienimmän kokoluokan (1-250 kW), matalan lämpötilan kennoja voidaan käyttää mm. asuinrakennuksissa. Höyrykoneet- ja turbiinit ovat näistä yleisimmin teollisuuskäyttöön. (Vartiainen et al. 2002)

2.3.6 Varavoimakoneet

Varavoimakoneet ovat esimerkiksi polttomoottorilla varustettuja aggregaatteja tai traktorikäyttöisiä generaattoreita. Koosta riippuen, polttomoottorilla varustettujen generaattoreiden käyttövoimana voi olla bensiini (pienimmät, kVA-luokka)

tai diesel (jopa yli MVA). Sähkökatkon sattuessa näillä varavoimakoneilla voidaan tyydyttää käyttöpaikan tarvitsema välttämätön sähköntarve, jota voi olla esimerkiksi ilmastointi, juomaveden pumppaus tai lypsykoneen pyöritys. Yli 50 kVA:n varavoimalaitteistot on yleensä varustettu automatiikalla (Valkonen et al. 2005). Pienimmissä aiheutuu lyhyt katko, joka ei kuitenkaan aiheuta merkittävää haittaa verrattuna mahdolliseen usean tunnin sähkökatkoon. Vastaavasti, hyötysuhteen tai käyttöiän merkitys on toissijainen. Oleellista sen sijaan on, miksi pitkä sähkökatko on päässyt muodostumaan. Tuotantomuotona varavoimakoneet eivät ole verkon kannalta merkittävässä roolissa, sillä niiden tehot liikkuvat kymmenissä kVA:ssa. Sen sijaan tärkeämpää on näihin väärinkäyttötilanteissa liittyvä takasyötön riski. Näin voi käydä, mikäli varavoimakone jostain syystä syöttääkin käyttöpaikan saarekkeen sijaan syöttävän verkon (jakelumuuntajan) suuntaan. Pääkeskukseen vaaditaan tällaisissa kohteissa vaihtokytkin, jolla estetään rinnankäynti (ET 2009). ET:n verkostosuosituksen mukaan tällaiset kohteet tulisi merkitä selkeästi sekä asiakkaan pisteestä että muuntajalla ja lisäksi työmaadoitukset tulisi tehdä työkohteen molemmin puolin (ET 2009).

2.4 Pientuotannon ja mikrotuotannon yhteenveto

Tässä luvussa määriteltiin hajautetun pientuotannon käsite ja teholuokat sekä käytiin läpi pientuotantomuotoja. Työn kannalta tärkeimmäksi kategoriaksi määritettiin pientuotanto, eli PJ-verkkoon liittyvä, alle 100 kVA:n tuotanto, johon sisältyy myös mikrotuotanto (<30 kVA). Luku pyrki vastaamaan kysymykseen *mitä mahdollisuuksia sähkön pientuotantoon on?* Tätä lukua koskeva tarkennus oli vastata kysymykseen tuotantomuotojen osalta.

Pientuotantoon on olemassa monia tuotantotapoja, jotka soveltuvat eri tavalla eri käyttöympäristöön. Käsitellyistä tuotantomuodoista aurinkovoiman soveltaminen on vähiten kiinni käyttökohteesta. Vesivoimantuotantomahdollisuuksia ei kovin monella ihmisellä ole. Biovoiman ja pien-CHP:n potentiaalisimpia kohteita ovat maatilat tai muut vastaavat ympäristöt. Tuulivoima soveltuu parhaiten maataloil- le, kesämökeille ym. kohteisiin, missä sen pystytyksestä ei koidu visuaalista haittaa. Varavoimakoneita ei tuotantomuodoksi voi kutsua, mutta niille, joille kat-

koista koituu harmin sijaan todellista hätää, voi elinkeinon jatkuvuus olla kiinni varavoimakoneesta. Sovellettava lupamenettely riippuu kyseessä olevasta tuotantomuodosta, rakennusympäristöstä ja paikkakunnasta. Joissain tapauksissa lupaa ei tarvita ja joissain tapauksissa voi ilmetä, että rakennus- tai ympäristölupaa ei voida myöntää lainkaan.

3 Pientuotannon hyödyntämispotentiaali ja tulevaisuuden näkymät

Tässä luvussa palataan jo aiemmin esitettyyn kysymykseen *millaisia mahdollisuuksia on sähkön pientuotantoon?* Edellinen luku käsitteli sitä, millä tavalla sähköä voi tuottaa ja tämä luku jatkaa kannattavuuden näkökulmasta Suomessa. Luvussa pyritään hahmottamaan kuva pientuotannon nykytilasta. Lisäksi luvussa tehdään katsaus pientuotannon rooliin tulevaisuudessa.

3.1 Kannusteita pientuotannolle

Pientuotannon kiinnostuksen taustalla on tarve parantaa sähkön käytön energia-
tehokkuutta. Myös ajatus edes osittaisesti omavaraisesta energian hankinnasta voi olla taustasyynä pientuotantolaitoksen hankkimiselle, jolloin taloudellinen merkitys on toissijainen. Riippumattomuus ulkopuolisen tahon toimittamasta sähköstä voi olla myös periaatekysymys. Uhkakuvat fossiilisten polttoaineiden loppumisesta ja hiilidioksidipäästöjen kasvamisesta yhdistettynä sähkönkäytön kasvuun ohjaavat etsimään uusia tuotantomuotoja ja -tapoja.

Energia- ja ilmastopakettin mukaan EU:n tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 20% (Suomi 16%) ja lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä 20% (Suomi 38%), samalla kun energiankulutusta pyritään vähentämään 20% vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä (Euroopan Komissio 2011). Pientuotannolla pystytään kasvattamaan uusiutuvien energialähteiden osuutta, vaikkakaan pientuotanto ei automaattisesti tarkoita uusiutuvilla energialähteillä tuotettua energiaa. Moni pientuotantomuoto kuitenkin on juuri sitä. Älykkäämmän sähköverkon avulla pyritään erityisesti sähkön käytön tehokkuuden parantamiseen. Hajautetun energiantuotannon myötä myös energiaomavaraisuus kasvaa ja ennen pitkää pientuotannolla voidaan vaikuttaa käyttövarmuuteen positiivisessa mielessä. Syöttävällä keskijännitejohdolla tapahtuva vika ei välttämättä pimennä koko lähtöä, vaan siihen liittyvät asiakkaat jatkavat sähkön käyttöä omalla tuotannolla. Sähkön hinta on ainakin tällä hetkellä kohtuullinen, mutta energian ja teknologi-

an hinnan kehitys tulevat olemaan osasyynä pientuotannon kiinnostavuuden lisääntymiseen.

Lainsäädännön avulla vaikutetaan sekä rajoittavassa että kannustavassa mielessä pientuotannon kannattavuuteen. Esimerkiksi itse tuotetusta sähköstä on maksettava veroa siinä missä verkkosähköstäkin, pl. alle 50 kVA:n generaattorit (Finlex, 1397/2010). Verkkoon syötetystä sähköstä ei saa taloudellista kompensatiota, ellei sähkölle ole ostajaa, mutta säästöä syntyy oman tuotannon myötä siltä osin mitä ei tarvitse ostaa sähköä myyjältä.

3.2 Pientuotannon nykytila Suomessa

Pientuotannon nykytilaa voidaan hahmottaa vertailemalla Suomen tilannetta Euroopan maihin. Laajempi ja yksityiskohtaisempi kansainvälinen vertailu jätetään tässä työssä tarkastelun ulkopuolelle, sillä aiheesta löytyy tietoa mm. Lehdon diplomityöstä (Lehto 2009).

Suomalaisen sähköenergiasektorin ominaispiirteitä verrattuna muiden EU-maiden tyypillisiin piirteisiin ovat:

- Sähkön hinta on Suomessa EU:n halvimmasta päästä niin absoluuttisesti, kuin ostovoimaan suhteutettunakin (Eurostat 2010)
- Sähkön toimitusvarmuus pitkällä aikavälillä hyvää tasoa* (ET 2009; ET 2010a)
* Kesän 2010 myrskyt ja joulun alla 2011 olleet katkokset aiheuttavat piikin tilastoihin.
- Tuontisähkön osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on suuri (ET 2010b)
- Suomi kuuluu yhteispohjoismaiseen sähköverkkoon
- Uusiutuvan energian osuus kokonaisenergian käytöstä on Suomessa hyvä EU:n keskiarvoon verrattuna (Liite I)
- Älykkään sähköverkon infrastruktuurin ja toiminnallisuuksien toteutus on Suomessa monia muita EU-maita edellä. Ensimmäinen konkreettinen askel, joka näkyy myös sähkökäyttäjille on etäluettavat mittarit, joiden hyödyntämisessä Suomi on Italian ja Ruotsin kanssa edistyksellisimpiä maita (Green Tech Media 2011).

Lehdon diplomityössä tehdyn tutkimuksen mukaan tämän työn määrittelyn mukaisesta pientuotantoa olisi lukumäärällisesti alle 50 kappaletta ja tuotantotehona noin 1,4 MW, kun kyselyyn oli vastannut noin puolet suomalaisista verkkoyhtiöistä, joiden osuus KJ- ja PJ-verkkopituuksista Suomessa kattaa noin 70% (Lehto 2009). Todellisesta määrästä ei ole virallisia lähteitä saatavana, tai ainakin ne ovat vanhentuneita, joten arviota on vaikea esittää tilastoinnin puutteen vuoksi. Joka tapauksessa, määrä on esitettyjä lukuja suurempi, mutta silti lähes olematon.

Suomi on EU:n kärkimaita uusiutuvan energian käytössä (Observ'ER 2011). Liitteessä I on havainnollistettu kuvin EU maiden osuuksia ja lisäksi sitä, kuinka tärkeää on ymmärtää mitä verrataan ja mihin verrataan. Uusiutuvaa energiaa hyödynnetään Suomessa suuremmissa voimalaitoksissa. Näin ollen, vaikka uusiutuvan energian hyödyntäminen on hyvällä tasolla ja vaikka pientuotanto useimmiten on uusiutuvaa energiaa, ei pientuotantoa silti ole Suomessa juurikaan.

Pienimuotoisen tuotannon yhteydessä oleellisena osana ovat taloudelliset tukitoimet. Näitä voivat olla rakennuskustannustuet, verohelpotukset tai energiantuotantotuet. Seuraavassa listassa on kootusti tukimuotoja ja helpotuksia Suomessa energiantuotantotavoittain (Finlex, 1397/2010).

- Verovapautus alle 50 kVA:n voimalaitoksista.
- Verovapautus 50-2000 kVA:n voimalaitoksista, jos ei verkkoonsyöttöä
- Investointituet
 - uusiutuviin energialähteisiin ja energiatehokkuuteen liittyvät investoinnit, uusi teknologia enintään 40%
 - uusiutuviin energialähteisiin liittyvät ja energiatehokkuuteen liittyvät investoinnit, tavanomainen teknologia enintään 30%
 - linjauksia vuodelle 2012 (TEM 2012a)
 - pienvesivoimalat 15-20%
 - pientuulivoima (tuetaan vain poikkeustapauksissa)
 - aurinkosähkö- ja aurinkolämpöhankkeet 30 ja 20%
- Syöttötariffi (tietyin ehdoin, riippuen markkinahinnasta) yht. 2500 MW asti
 - yli 500 kVA:n tuulivoimaloista 83,5 €/MWh, 12a
 - yli 100 kVA:n biovoimaloista 83,5 €/MWh
 - muuttuva tuotantotuki yli 100 kVA:n metsähakevoimaloista päästöikeyden hinnan mukaan enintään 18 €/MWh
 - puupolttoainevoimalaitos tietyin edellytyksin ja rajoituksin 83,5 €/MWh

Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti antaa lisäksi osviittaa siitä mitkä tuotantomuodot on nähty olevan avainasemassa vuoteen 2020 saakka (TEM 2011). Ensisijaisia tuettuja energiamuotoja ovat erilaiset ”metsäenergiamuodot”, biovoima, tuulivoima ja vesivoima (TEM 2011). Tukitoimilla pyritään ensisijaisesti edistämään energiankäytön tehostamis- ja ilmastotavoitteisiin pyrkimistä. Tukitoimet ovat yleensä väliaikainen ratkaisu. Massiivisten tukitoimien ja niiden mahdollisesti aiheuttamien verkkoinvestointitarpeiden maksajaksi päätyisivät lopulta kyseisen alueen asiakkaat ja veronmaksajat yleensä, jos niillä vauhditettaisiin suurissa määrin uusia investointeja. Uusiutuvan energian tuotantotuet ovat suurimmillaan vuonna 2022, jolloin niiden vaikutuksen on arvioitu näkyvän sähkön hinnassa 0,36 c/kWh, joka tarkoittaa 3-4% tutkimuksen aikaisista verottomista sähkön hinnoista (Kivistö & Vakkilainen 2011). Vaikka tukitoimet aiheuttavat kansantaloudellisesti kustannuksia, voidaan niillä saavuttaa myös positiivisia vaikutuksia, esimerkiksi työpaikkoja piristyneen kysynnän myötä.

Alussa listattiin muutamia suomalaisen sähkösektorin ominaispiirteitä. Alla oleva lista täydentää alun listaa, keskittyen pientuotantoon.

- Pientuotannon määrä on Suomessa vähäinen.
- Pientuotantoa tuetaan Suomessa heikosti (yllä oleva lista, Finlex, 1397/2010).
- Pientuotanto ei ole (vielä) saavuttanut suurta mielenkiintoa Suomessa
- Pientuotannolle ei ole selvää markkinamallia (Sähkömarkkinalaki 1995)
- Pientuotannon verkkoonliittäminen on uusi asia useimmille verkkoyhtiöille
- Sähkön hinnan kehitys on oletusarvoisesti kalliimpaan suuntaan (EMV 2012)
- Sähkön kulutus jatkaa kasvuaan vähintäänkin jossain määrin, mm. tulevaisuudessa sähköautot (EK & ET 2011)
- Päästökaupan vaikutus sähkön hintaan lisääntyy
- Tekniikan kehittyminen ja hintojen aleneminen parantaa kannattavuutta
- Laajamittaiseen yleistymiseen varautuminen on kannattavaa, jopa välttämätöntä

Suomessa pientuotanto on pääosin taloudellisesti kannattamatonta. Lisäksi poliittiset signaalit antavat epävarman kuvan pientuotannon tulevaisuudesta.

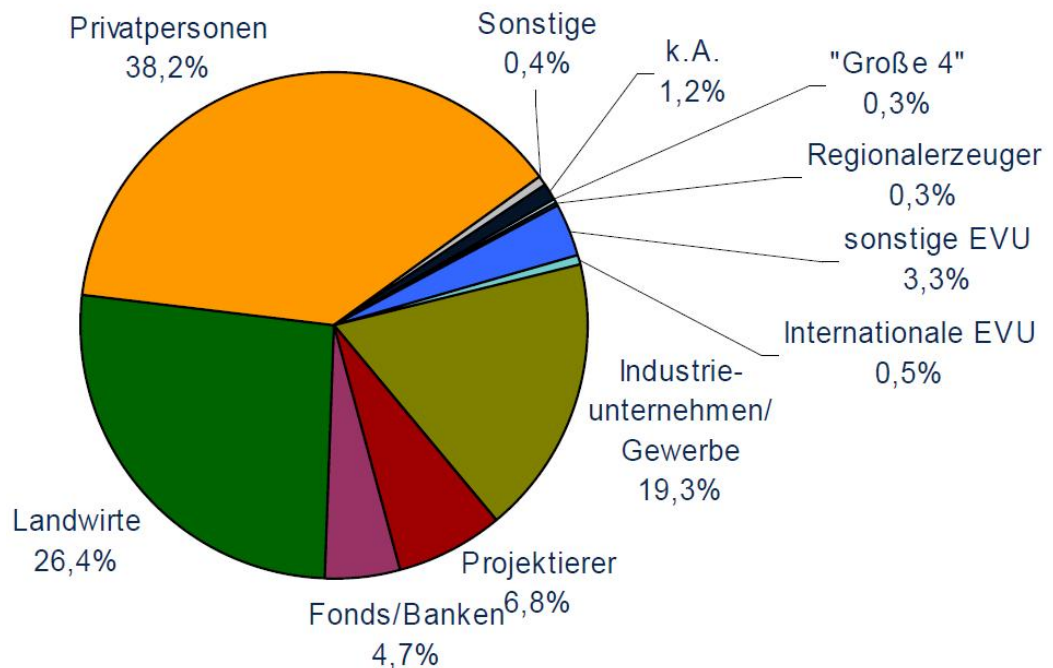
3.3 Pientuotannon tilanne Euroopassa

Työssä on useaan otteeseen otettu Suomen vertailukohdaksi Saksa. Saksa on hyvä esimerkki siitä, kuinka nopeasti ihmiset tempautuvat uuteen ”buumiin” mukaan, kun sille luodaan edellytykset. Toisaalta esimerkki toimii myös varoittavana, sillä hyvin nopeasti yleistyvät pienet tuotantolaitokset alkavat vaikuttaa järjestelmälaajuisesti, kun niitä on verkossa tarpeeksi. Saksassa on realisoitunut ns. ”50.2 Hz ongelma”, joka tarkoittaa yksinkertaistettuna sitä, että verkossa on hetkellisesti enemmän tuotantoa kuin kulutusta. Tällöin 9 GW PJ-verkkoon syötävää aurinkovoimaa voi irrota kerralla ylitaajuusasettelusta (Börner et al. 2011). Tilanteeseen on reagoitu sivistyneemmällä ylitaajuusasettelulla (VDE AR-N 4105). Tilanne kuvastaa hyvin sitä, että Saksassa vaikutukset ovat jo järjestelmänlaajuisia, kun taas Suomessa tuotantoa ei ole juuri lainkaan.

Merkittävimpiä seikkoja pientuotannon yleistymiseen tähän saakka ja jatkonäkymiin Saksassa ovat muun muassa seuraavat:

- Päätös luopua ydinvoiman käytöstä
- Syöttötariffien käyttö
- Kunnianhimoinen energiaohjelma
- Sähkölle on taattu ostaja
- Priorisoitu verkkoon pääsy
- Verkkoja joudutaan vahvistamaan
- Liitetyt tuotantolaitteistot pystyvät vaikuttamaan jo järjestelmänlaajuisesti

Kuvassa 3.1 on havainnollistettu yksityishenkilöiden suurta roolia uusiutuvan energian hyödyntämisessä. Tämä tarkoittaa sitä, että PJ-verkossa on huomattava määrä erityisesti aurinkovoimaa.



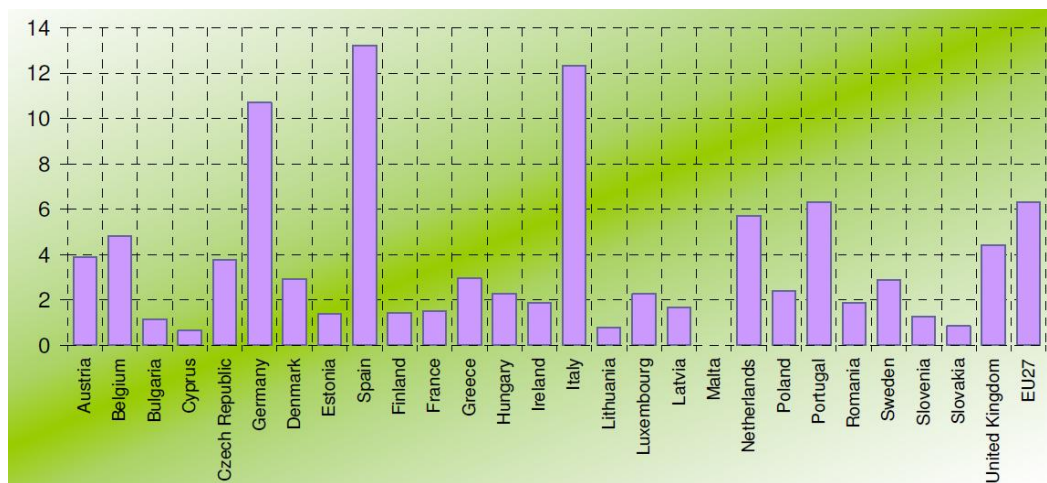
Kuva 3.1. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön omistajuusosuudet vuonna 2010. Yksityishenkilöt (privatpersonen) ja maanviljelijät (landwirte) muodostavat tästä osuudesta lähes kaksi kolmasosaa. (trend:research GmbH 2011)

Uusiutuvan energian tuotantoyksiköistä ($P_N < 500 \text{ kW}_P$) yli 38% omistivat yksityisasiakkaat. Tämän kokoluokan asennettu nimellisteho oli lokakuussa 2011

julkaistussa tutkimusraportissa yhteensä noin 18 GW. (trend:research GmbH 2011)

Saksassa aurinkoenergian tuotantoa on tuettu voimakkaasti. Esimerkiksi vuonna 2009 tuotetusta kilowattitunnista sai Saksassa 43 c/kWh (BSW Solar 2011). ELSPOT-keskihinta oli Suomessa vuonna 2009 noin 3,7c/kWh ja vuonna 2010 vähän alle 5,7 c/kWh (Nord Pool Spot 2011). Tukia on leikattu Saksassa ja vuoden 2012 alusta vastaavalle tuotantolaitokselle maksetaan tuotantotukea 24,43 c/kWh (katolle asennettava, <30 kW_p) (Erneuerbare Energien Gesetz 2011). Suomessa aurinkoenergian tuotannolle ei makseta syöttötariffia, mutta investointitukea on mahdollista saada laitoksen hankkimiseen (Finlex 1397/2010). Muita uusiutuvan sähköntuotannon suurmaita ovat mm. Espanja, Itävalta, Italia, Ranska ja Ruotsi (Observ'ER 2011).

Yksinkertaisen ja havainnollistavan taulukon koostaminen EU-maissa käytettyjä uusiutuvan energian tukikeinoista on hankalaa maakohtaisten erityispiirteiden (tuotantomuoto, kokoluokat, tuen määrä, tukimuoto, maksuaika, rajoitteet ym.) vuoksi. Aiheesta löytyy monia raportteja, esimerkiksi vuonna 2011 tehdyssä julkaisussa asiaa on käyty varsin seikkaperäisesti (264s.) läpi (Steinhilber et al. 2011). Lisäksi aiheesta löytyy myös kotimainen, ET:n teettämä selvitys (103s.) (Marja-Aho 2011). Alla oleva kuva 3.2 esittää maksettuja tukia vuodelta 2009.

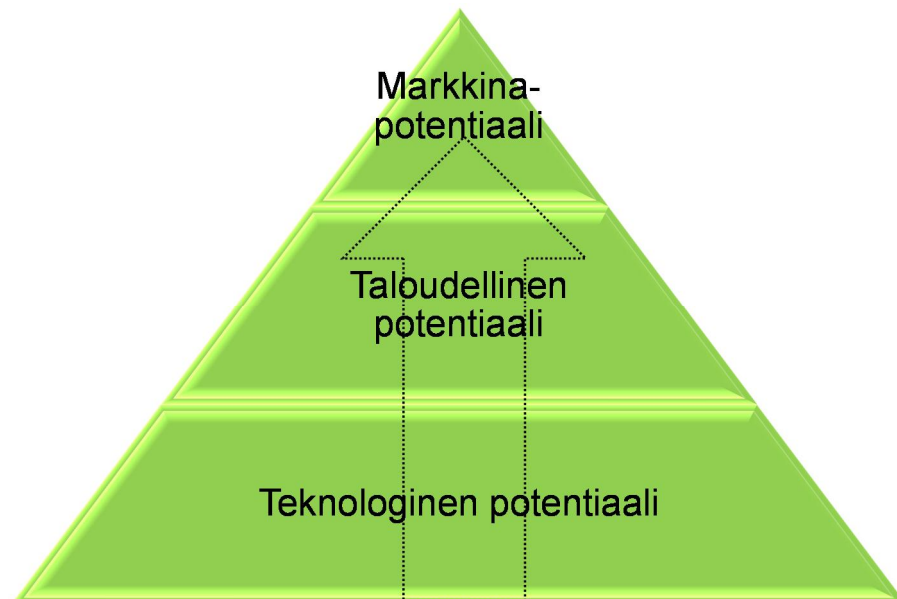


Kuva 3.2. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetulle sähkölle maksetut tuet EU-27 maissa vuonna 2009, suhteutettuna maan kokonaissähköenergian käyttöön. (de Jager et al. 2011)

Liitteessä II on lisäksi esitetty eri tuotantomuotojen käyttöastetta eri EU-27 maissa (Steinhilber et al. 2011). Siinä näkyvät tulokset tukevat yllä olevaa kuvaa ainakin suurmaiden osalta. Aurinko- ja tuulivoiman kärjessä ovat Espanja ja Saksa, Suomi on loppupäässä ”epäkypsien” joukossa. Biomassan käytössä Suomi on maista selvästi edistyksellisin.

3.4 Tulevaisuuden näkymät

Älykkäät sähköverkot ja niihin liittyvien toimintojen tutkimus on selvästi lisääntynyt ja on jatkossakin sähköverkkoliiketoiminnan kehittämisessä mukana. Uusiin toimintojen käyttöönottoon liittyy kuitenkin haasteita. Oleellinen kysymys on, millä keinoilla liittyvän tuotannon mukanaan tuomat haasteet voidaan ratkaista siten, että niistä koituvat kustannukset eivät oleellisesti nosta siirtohintoja, mutta toisaalta voidaan varmistua turvallisesta käytöstä. Alla oleva kuva 3.3 esittää uuteen teknologiaan tai tuotteeseen liittyvää potentiaalia.



Kuva 3.3. Markkinapotentiaali. (Muokattu lähteestä: Vartiainen et al. 2002)

Jos jokin on mahdollista toteuttaa teknisesti, vasta taloudellinen potentiaali määrittää, onko sillä todellista sijaa markkinoilla. Sähköverkkoliiketoiminnassa raha on sidottu verkkoon hyvin pitkäksi aikaa ja investoinnit näkyvät asiakkaiden siirto-

hinnoissa. Pientuotannon verkkoon liittäminen voidaan jakaa kolmeen porttaaseen (Wolff 2008):

- 1) Sallitaan verkkoon kytkeminen
- 2) Verkkoon kytkettyjä laitoksia voidaan ohjata
- 3) Verkkoon kytketyt laitokset osallistuvat itse aktiivisesti tuotannon optimointiin

Ensimmäisessä vaiheessa varmistetaan siitä, että verkkoon liitettävä tuotantolaitteisto täyttää sille asetettavat ehdot (verkkokoodit ja liittämisstandardit), jotta se voidaan liittää verkkoon. Eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestön (ENTSO-E) tavoitteena on saada julkaistua harmonisoidut verkkokoodit vuonna 2014. Tämä auttaa myös laitevalmistajia. Toisessa vaiheessa hallintaan on olemassa muitakin vaihtoehtoja kuin että tuotetaan tai ei. Optimoijana voi olla esimerkiksi hajautettuja resursseja hallitseva aggregaattori. Kolmannessa vaiheessa tuotantoa voidaan optimoida kuormitustilanteen tai markkinahinnan suhteen ilman, että toimintaan tarvitsee välttämättä ihmisen puuttua. Ykköskohta onnistuu jo nyt, kakkoskohta vaatii mm. markkinamallin ja kolmoskohta laskentamalleja, tiedonsiirtostandardeja ja järjestelmän kokonaisvaltaisen hallintajärjestelmän, joka itsessään koostuu muista järjestelmistä ja automaatiosta. Vaikka ykköskohta onnistuu jo nyt, ei se kuitenkaan vielä ole ongelmaton ja sujuvaa.

Markkinapotentiaaliin vaikuttaa siis teknis-taloudellinen kannattavuus. Hajautettua tuotantoa ei kuitenkaan useimmiten voi perustella taloudellisella kannattavuudella vaan kannusteita on haettava myös muuta kautta. Kuvasta 3.4 nähdään aihepiirejä, jotka vaikuttavat hajautetun tuotannon markkinapotentiaaliin.

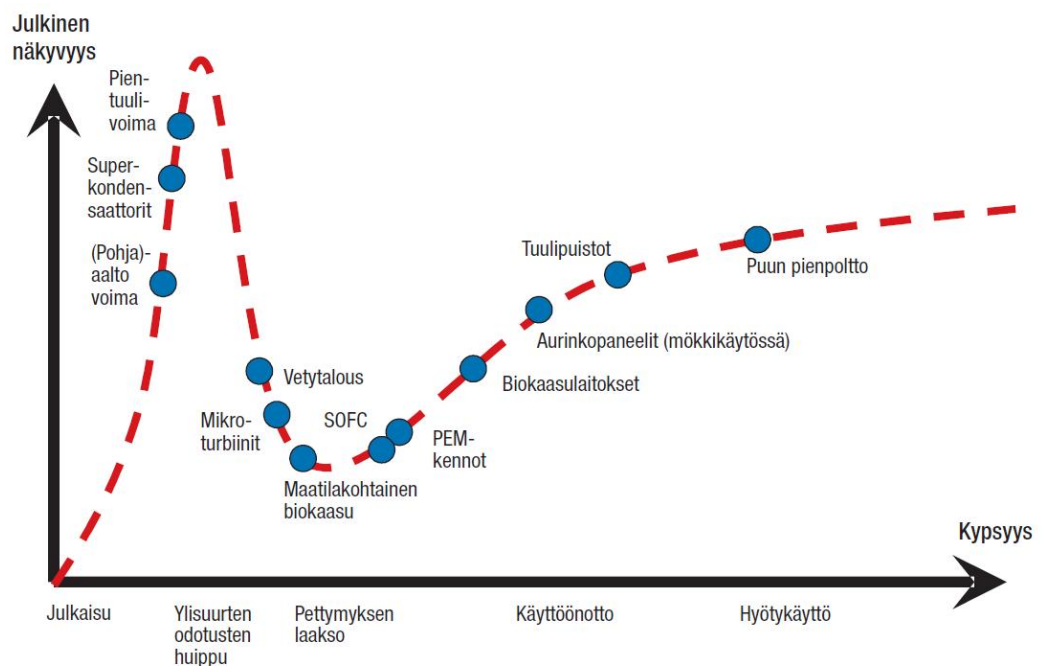


Kuva 3.4. Hajautetun energiatuotannon markkinapotentiaaliin vaikuttavia tekijöitä. (Muokattu lähteestä: Vartiainen et al. 2002)

Pientuotanto tulee yleistymään tulevaisuudessa, mutta yllä olevassa kuvassa olevat tekijät määräävät pitkälti tämän kehityksen nopeuden. Erityisesti akkuteknologian kehitys on osa-alue, jolla on monia käyttökohteita. Vielä tähän asti sähköenergian varastointi on ollut kallista ja käytännössä mahdotonta siinä laajuudessa, jolla olisi todellista merkitystä verkkojen ja markkinoiden kannalta. Energia-varastojen käyttö SG-ympäristössä on kuitenkin lähes välttämätöntä. Lisäksi ns. Grid Parity, eli tilanne, jossa itse tuotetun sähkön hinta on sama kuin verkosta ostettu, tullaan saavuttamaan monissa maissa erityisesti aurinkoenergian osalta lähivuosien aikana (Wacker Polysilicon 2010).

Poliittiselta sektorilta toivoisi selkeitä signaaleita, mikäli halutaan lisätä hajautettua energiantuotantoa. Juuri ilmoitettu lopetuspäätös kiinteästä sähkön tuotantotuesta antaa epävarman signaalin pientuotannon näkymistä eikä kannusta investoimaan. Tuki ei koskettanut lukumäärällisesti suurta joukkoa, mutta sen lopettamisella oli suurempi symbolinen merkitys kuin taloudellinen.

Sosiaalisen toimintaympäristön muuttuminen on hidasta, mutta kiinnostus pien-
tuotantoa kohtaan lisääntyy ajan myötä. Tuotantolaitteiston hankkiminen tulisi
olla taloudellisesti kannattavaa ja riittävän yksinkertaista, jotta positiivinen asen-
ne ja kiinnostus kasvaisivat. Myös hallintajärjestelmät ja tietoliikenneyhteydet
nousevat suurempaan arvoon tulevaisuudessa. Uusi toimintaympäristö mahdol-
listaa myös markkinasauman erilaisille palveluntuottajille ja luo sitä kautta uusia
työpaikkoja. Kuvassa 3.5 on esitetty näkemys siitä, minkälaisen tien uudet tek-
niikat joutuvat kulkemaan, ennen kuin niitä voidaan käyttää hyödyksi.



Kuva 3.5 Hajautetun energiatuotannon tuotantomuotojen ”hypekäyrä” vuonna 2008. (Timonen et al. 2008)

Kunkin tuotantomuodon etenemisnopeus ”hypekäyrällä” riippuu eri tekijöistä,
eikä ole poissuljettua, vaikka janalta tippuisi kokonaan jokin muoto pois. Tutki-
musraportissa oli esitetty vastaava kuva vuonna 2003, jolloin polttokennot
(SOFC ja PEM) eivät vielä olleet saavuttaneet edes ”ylisuurten odotusten huip-
pua” ja mikroturbiinit olivat lähes vastaavassa tilanteessa (Timonen et al. 2008).
Edistystä voi siis tapahtua suhteellisen nopeasti, riippuen mm. kuvassa 3.4 mai-
nituista asioista.

3.4.1 Älykkäät sähköverkot

Älykkään sähköverkon, Smart Gridin (SG) määritelmä vaihtelee riippuen sen määrittelijästä. Useimmiten sanat *tehokkuus* ja *palvelu* ovat mukana jollain tavalla. Alla on ET:n määritelmä:

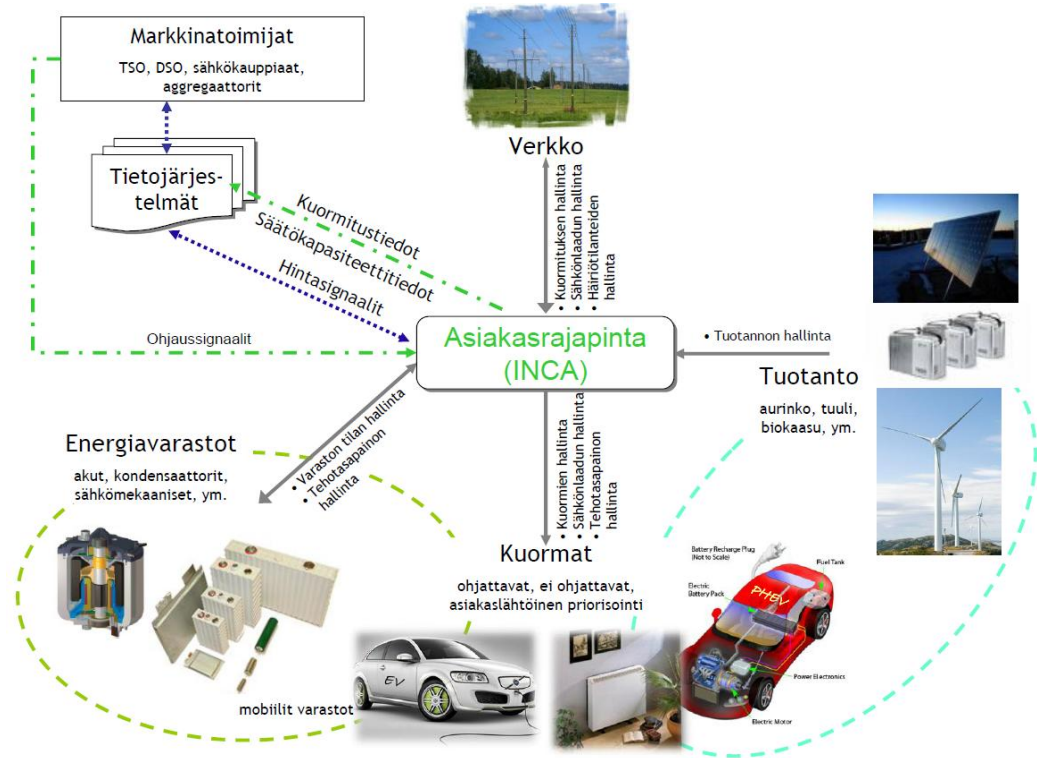
”Älykäs sähköverkko mahdollistaa sekä keskitetyn että hajautetun sähköntuotannon ja ohjattavan monisuuntaisen tehonvirtauksen. Verkon käyttö perustuu reaaliaikaiseen tietoon. Älykäs verkkoteknologia mahdollistaa kaksisuuntaisen kommunikaation sähkön tuottajan ja kuluttajan välillä. Älykkään sähköverkon etuja ovat energiansäästö, kulujen lasku, kuluttajien vaikutusmahdollisuudet sekä sähköverkon lisääntynyt toimintavarmuus ja -turvallisuus.” (ET 2012)

Hajautettu tuotanto on oleellinen osa älykkäitä sähköverkkoja. Pientuotantoon nojaavat monet älykkäisiin sähköverkkoihin hahmotellut ominaisuudet. Sen takia on tärkeää selvittää, kuinka suuren työn takana pientuotannon laajamittaisempi yleistyminen tai sen mahdollistaminen on.

Älykkäitä sähköverkkoja rakennetaan jatkuvasti, eikä niitä pitäisi nähdä niinkään valmiina kokonaisuutena vaan ennemminkin visiona, jota kohti edetään askel kerrallaan. Näin ajateltuna, Suomessa ei ole vuonna 2014 tyhmää verkkoa, jonka mittareista 80% on etäluettavia. Sen sijaan on verkko, joka mahdollistaa kahdensuuntaisen tiedonsiirron ja lukuisen määrän energiatehokkuutta tukevia toimintoja, joita voidaan hyödyntää ja ottaa käyttöön asteittain. Tätä on luonnehdittu myös Smart Grid 1.0:ksi ja energian internetiksi (ABB 2009).

Älykkäitä sähköverkkoja voidaan pitää myös sähkön joustavana markkinapaikana. Ennen kaikkea ne mahdollistavat aktiivisemmän osallistumisen sähkön käyttöön eri osapuolten kesken ja siihen liittyvän tiedon vaihdon. Työn alussa mainittiin ”älykäs piste”, jonka AMR-mittarit luovat. Tämä asiakkaan ja verkon rajapinta on erittäin tärkeä energian ja informaation solmupiste tulevaisuuden verkoissa, sillä erityisesti sen ympärille rakentuu monia toimintoja. Alla on esi-

tetty kuva niistä toiminnoista, joita interaktiiviseen asiakasrajapintaan (Interactive Customer Gateway, INCA) liittyy. (Partanen 2010)



Kuva 3.6 Interaktiivisen asiakasrajapinnan toiminnot. (Partanen 2010)

Jos kuva jaetaan kahtia keskeltä vaakasuorasti, voidaan alapuoliseen osaan jääviä komponentteja kutsua energiaressseiksi, joista puhuttiin kappaleessa 2.1. Näitä resursseja voidaan ohjata joustavasti. Asiakas pystyy vaikuttamaan omaan sähkön käyttöönsä, eikä muiden optimointitehtävien toteutus häiritse asiakasta. Oma tuotanto toimii sähköverkon rinnalla ja tarvittaessa myös saarekkeena. Tiedonsiirtoyhteydet ovat merkittävässä roolissa sähköturvallisuuden, verkon käytön optimoinnin ja markkinoiden kannalta. Verkkoliityntäpisteen tehon suunta voi vaihdella, mutta siihen voidaan tarvittaessa vaikuttaa, siitä voidaan informoida ja siihen voidaan varautua. Toimitusvarmuus, sähkön laatu ja energiatehokkuus ovat entistä paremmat. Markkinat ohjaavat sähkön käyttöä, asiakas on yksi toimija ja hyötyy siitä. (Partanen 2010)

Edellä esitelty konsepti on Smart Grid visio 2035. Joitakin osia siitä on jo käytössä ja tutkimustyötä tehdään kokoajan. Erityisesti akkuteknologia vaikuttaa merkittävästi niin sähköautojen kuin energiavarastojenkin yleistymiseen. Lisäksi verkossa voi olla muutakin uutta tekniikkaa, kuten pienjännitteistä tasasähköjaka-
kelua (LVDC), jolla päästään pidempiin PJ-johtopituuksiin ja voidaan parantaa
sähkön laatua sekä yksinkertaistaa pientuotantoa verkkoonliittämistä. Hyvin
oleellisena osana SG-ympäristöä ja visiota ovat myös sähkömarkkinat. Seuraa-
vassa kappaleessa tarkastellaan tulevaisuuden näkymiä sähkömarkkinanäkökul-
masta.

3.4.2 Sähkömarkkinanäkökulma

Nykyisen mallin mukaan verkkoon liitettyä pientuotantoa on joko niin vähän, että verkkoon syöttöä ei ole, tai verkkoyhtiön kanssa on sovittu verkkoonsyötöstä vähäisissä määrin. Tämä osuus vähentää verkkoyhtiön häviösähkön hankintaa. Nykyinen malli ei kuitenkaan ole kestävä, jos tuotantoa liitetään verkkoon enemmän. Toimintatapa on nähtävä väliaikaisena ratkaisuna. Sähkömarkkinalain mukaan verkkoonsyöttö tulisi estää, mikäli sähkölle ei ole ostajaa (Sähkömarkkinalaki 1995). Positiivista ratkaisussa on se, että on annettu mahdollisuus syöttää ylijäämää verkkoon päin, vaikka velvoitetta siihen ei olisi.

Mikäli pientuottaja haluaisi toimia sähkömarkkinoilla, toisi se mukanaan monia haasteita. Tuotannon ennustaminen, tasehallinta, mittarointi ja ostajan löytäminen ym. seikat, yhdistettynä pientuotannon luonteeseen ja energiamääriin tekevät toiminnasta kannattamatonta. Yksi vaihtoehto on osto-myyntisopimus sähkön myyntiyhtiön kanssa käyttöpaikan osalta. Toinen vaihtoehto on aggregointimalli, jossa kapasiteettia olisi useamman pientuotantolaitoksen verran ja sähkön myynnistä sekä siihen liittyvistä toimista vastaisi joku erillinen taho. Tämän toiminnan hallitseminen on todella haastava optimointitehtävä, mutta toisaalta myös liiketoimintamahdollisuus. Riippuen markkinoista, ovat asetettavat vaatimukset reagointiajasta erilaisia. (Lehto 2009)

Kysyntäjousto on myös yksi aihepiiri, jota tutkitaan ja josta on keskustelua. Se tarkoittaa kulutuksen vähentämistä tietyllä hetkellä, tai kulutuksen siirtämistä johonkin edullisempaan ajankohtaan. Tarkoituksena on tasoittaa järjestelmässä tai paikallisesti verkossa esiintyviä kulutushuippuja. Kantaverkkotasolla vastaavaa toimintaa on esimerkiksi isojen teollisuuslaitosten osalta, mutta jakeluverkoissa ei juurikaan perinteistä päivä-/yö-tariffinohjausta enempää. AMR-mittarit ovat yksi ”gateway”, jonka kautta ohjattavia kuormia voisi hallita. Tämä edellyttää tehokkaita kahdensuuntaisia tiedonsiirtoyhteyksiä, katkaisijatoimintoja ja mittauksia. Näille ominaisuuksille on myös muita käyttökohteita SG-ympäristössä. Kuormanohjaukseen liittyy yksi oleellinen kysymys. Kuka hallitsee kuormia? Lisäksi, jos asiaa ajatellaan muuntopiiritasolla, markkinaehtoinen optimi ei välttämättä tarkoita juuri sillä hetkellä kuormitusoptimia.

Nykyiset kuormituskäyrät eivät enää kelpaa kulutusennusteiksi jatkossa muun muassa siksi, että kuormitus voi olla myös negatiivista ja koska verkon kuormituksen satunnaisvaihtelu voi olla nykyistä suurempaa mm. hajautetun sähköntuotannon vuoksi. Kun huomioidaan sähköautojen vaikutukset ja muuttuva tuotanto asiakaspäässä, on kuormituksen ennustaminen enemmänkin dynaaminen prosessi jollakin aikaennakolla kuin nykyinen lokerointimalli tyyppikäyttäjittäin ja aikasarjoittain. Jonkinasteista ryhmittelyä voi olla jatkossakin datamäärien ja aikakriittisyyden takaamiseksi. Sähkön hankintatarpeen ennakointi muuttuu sähkön myyjälle hankalammaksi. Yksi vaihtoehto kuormituksen ennustamiselle on eräänlainen osakuormitusmalli, jossa kullekin asiakkaalle sovitetaan eri tyyppien ennusteista osia, jotka reagoivat eri tavalla esimerkiksi hintasignaaliin ja joista muodostetaan lopulta yksilöllisempi kuormitusennuste. (Koreneff 2010)

AMR-mittareiden mahdollistaessa tarkan mittauksen, on asiakkailta mahdollista veloittaa käytetystä sähköstä pörssihinnan mukaan. Hintapiikkien vuoksi tämä olisi asiakkaan kannalta ikävää. Tariffit toisaalta tulevat muuttumaan nykyisistä, todennäköisesti kaistatyyppisten suuntaan. Kaiken kaikkiaan nykyisiltä asiakkailta, joista tulevaisuudessa ainakin osa on myös tuottajia, vaaditaan aktiivisempaa roolia sähkön käytön suhteen. Jotta aktiivinen osallistuminen toteutuisi

järkevästi, sille on oltava taloudellisia kannusteita ja teknologian avulla osallistumisen on onnistuttava ilman erityistä vaivannäköä.

Yhteiseurooppalaisten sähkömarkkinoiden integroimisesta on puhuttu pitkään ja siitä puhutaan jatkossakin. Kilpailu markkinoilla takaa tehokkaan sähkön käytön ja energian tuottamisen siellä missä se on halvinta. Ainakin hintapiikkien tulisi vähentyä. Sähkön hintatasoon on vaikea ottaa kantaa, mutta tällä hetkellä sähkön hinta on Euroopassa Suomea korkeampi. Siirtoyhteydet ovat edelleen pullonkaula ja riittämätön kapasiteetti syö pohjan markkinoiden toiminnalta eri hinta-alueiden myötä. Lisäksi markkinamallien yhdyntymisessä ja tasehallinnassa on sovittelavaa. Vaikka yhteispohjoismaiset markkinat toimivatkin hyvin, ei se tarkoita, että ne olisivat ”vietävissä Eurooppaan” vaan ennemminkin niistä tulee ottaa oppia. Euroopan sähkömarkkinoiden lopullisen yhdistymisen ajankohtaa on mahdoton sanoa. EU:n laajuisten tukkumarkkinoiden suhteen tavoitevuotena on 2014 ja yhteispohjoismaisten vähittäismarkkinoiden suhteen 2015. (EMV 2011)

3.5 Yhteenveto pientuotannon nykytilanteesta

Pientuotannon rooli Suomen sähköntuotannossa on pieni. Pientuotannon rooli sähkömarkkinoilla on myös epäselvä. Nykyinen tilanne ei suoranaisesti kannusta ihmisiä hankkimaan tuotantolaitoksia. Pientuotannon merkitys osana SG:ä on merkittävä ja SG:n rooli on merkittävä energiatehokkuuspyrkimyksissä ja sähkön käytön tehostamisessa. Tulevaisuuden tavoitteiden ja visioiden perusteella voidaan todeta, että nykyisten sähkökäyttäjien on oltava aktiivisempia sähkön käyttäjiä. Vaatimus ei suinkaan ole pakote vaan tekniikoiden, lainsäädännön ja tietoisuuden kehittyessä lisääntynee omaehtoinen kiinnostus sähkökäyttöä kohtaan toiminnan ”arkipäiväistymisen” myötä. AMR-mittarit mahdollistavat oman sähkönkäytön tarkastelemisen reaaliajassa jo nyt ja ovat hyvä lähtökohta ja ennenkaikkea ”gateway” muita tavoitteita varten. Kaiken kaikkiaan toimintaympäristön muutos näyttää väistämättömältä ja siihen liittyy useampia osa-alueita, joten muutos vaatii aikaa. ”Muutos” on huono sana kuvaamaan ilmiötä, koska se tuo mielikuvan muutoksesta tapahtumana, jolla on alkupiste ja loppupiste. Tässä tapauksessa muutos on sen sijaan jatkuva prosessi.

4 Tuotannon verkkoon liittäminen

Tämä luku käsittelee verkkoon liittämistä, edellytyksiä, osapuolia, liittämistekniikoita ja haasteita. Luvussa korostuu erityisesti verkko- ja verkonhaltijan näkökulma. Luku pyrkii kuvaamaan, mitä pientuotantolaitteiston liittämisesä on huomioitava verkon näkökulmasta.

4.1 Vaatimukset verkkoon liitettävältä tuotantolaitteistolta

Pientuotannon verkkoon liittämisesellä on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Esimerkiksi, pitkän johtolähdön jännitteenalenemaa voi ”kompensoida” johdon loppupäässä oleva tuotantoyksikkö. Toisaalta, tuotantolaitos voi nostaa jännitetason myös sallittua korkeammaksi, mikäli johdon kuormitus on pientä. Saarekekäytössä taajuus voi poiketa 50 Hz:stä ja saarekekäyttöön liittyy myös muita haasteita. Yksivaiheiset laitteistot aiheuttavat epäsymmetriaa vaiheiden kesken. Suuntaajalaitteistolla liittyvät tuotantoyksiköt aiheuttavat aina jonkun verran säröä. Lisäksi, mikäli tuotanto on vaihtelevaa, voi esiintyä välkyntää ja nopeita jännitevaihteluita. Kaikki nämä ovat haitallisia verkon ja myös asiakkaan sähkön laadun kannalta, minkä takia on asetettu raja-arvoja ja vaatimuksia.

Edellä mainitut ilmiöt aiheuttavat (pl. saarekekäyttö) lähinnä sähkön laadullisia ongelmia tai epämiellyttäviä ilmiöitä verkossa, mutta eivät heti johda vakavaan ongelmaan tai vaaratilanteeseen. Sen sijaan, kun otetaan huomioon lisäksi sähköturvallisuusseikat, on tilanne ehdottomampi. Verkossa tapahtuva vika ei saa aiheuttaa tapahtumaketjua, josta aiheutuisi vaaraa sähkönkäyttäjille, asentajille tai ylipäätään kenellekään sivulliselle. Suojauksen tulisi aukottomasti estää niin henkilövahingot kuin verkkokomponenttien vahingoittuminen. Mikäli asiakas haluaa liittää tuotantolaitoksen käyttöpaikkaansa, velvoittaa sähkömarkkinalaki pyynnöstä ja kohtuullista korvausta vastaan verkkoyhtiön niin tekemään, jos tuotantolaitos täyttää sille asetetut tekniset vaatimukset (Sähkömarkkinalaki 1995).

Seuraavassa listassa esitetyt ohjeet ja standardit ovat tärkeimpiä dokumentteja, jotka ottavat kantaa tuotantolaitosten PJ-verkkoon liittämiseen:

- ET:n verkostosuositus mikrotuotannon verkkoonliittämisestä (ET 2009)
- ET:n ohje *Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon* (ET 2011a)
- Pöyryn pientuotannon liittämisohje (Pöyry 2006)
- SFS-EN 50160, *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet* (SFS-EN 50160)
- SFS-EN 50438, *Requirements for the connection of microgenerators in parallel with public low-voltage distribution networks* (SFS-EN 50438)
- EMC- standardit; 61000-sarja; 6-1, 6-3, 3-2, 3-3 (ET 2009)
- Käytön- ja tuotannon liittämisen- ja verkkopalveluehdot (VPE, LE, TVPE, TLE), taulukko 4.1. (ET 2011a)
- PJ-sähköasennuksien osalta SFS 6000, *Pienjännitesähköasennukset* (SFS 6000)
- Sähkötyöturvallisuuden osalta SFS 6002, *Sähkötyöturvallisuus* (SFS 6002)
- Lisäksi monella verkkoyhtiöllä on omia verkostosuosituksia tai hyviä ”tietois-kumaisia” ohjeita, jotka pohjautuvat hyvin pitkälti tässä listassa läpikäytyihin ohjeisiin ja vaatimuksiin.

Lisäksi lähitulevaisuudessa julkaistaan standardi 50549 *Requirements for the connection of generators above 16 A per phase - Part 1: Connection to the LV distribution system*, joka sisältää lisäohjeita ja vaatimuksia tuotannon liittämisestä PJ-verkkoon tämän työn kannalta relevantissa teholuokassa (CENELEC 2012).

Eurooppalaisten siirtoverkko-operaattoreiden yhteinen kattojärjestö ENTSO-E on julkaissut luonnoksen yhteiseurooppalaisesta verkkokoodista (grid code) (ENTSO-E 2012). Tässä ns. pilottikoodissa on hajautetun tuotannon näkökulmasta (< 2 MVA), kaksi kiinnostavaa kategoriaa (ENTSO-E 2012):

- A) "A Synchronous Generating Unit or Power Park Module is of **Type A** if its Connection Point is below 110 kV and its Maximum Capacity is 400 W or more."
- B) "A Synchronous Generating Unit or Power Park Module is of **Type B** if its Connection Point is below 110 kV and its Maximum Capacity is at or above a threshold which is decided by each Relevant TSO pursuant to Article 4(3). This defined threshold shall not be above the threshold for Type B units according to table 1". (Taulukosta 1: tarkoittaa 1,5 MW pohjoismaissa)

Synchronous generating unit on määritelty verkkokoodiluonnoksessa seuraavasti: "*a synchronously operating Generating Unit that is synchronously connected to the network without any frequency converters.*", mikä tarkoittaa verkon kanssa tahdissa olevaa, ei tehoelektroniikkaliitännäistä tuotantoyksikköä (ENTSO-E 2012). Power Park Module (PPM) taas määritellään: "*any unit or ensemble of units generating electricity which is not synchronously connected to the network. This includes any connection through power electronics and any ensemble of units having a single Connection Point to the network.*", mikä tarkoittaa yhden tai useamman, verkon kanssa eri tahdissa olevan tuotantoyksikön muodostamaa kokonaisuutta, jolla on yhteinen verkkoliityntäpiste ja joka sisältää tehoelektroniikan välityksellä liittyvät tuotantolaitteistot (ENTSO-E 2012). Verkkokoodeja ja ENTSO-E:n verkkokoodiluonnosta (vanhempi versio) on tarkasteltu J-P Vainikan diplomityössä (Vainikka 2011).

Kategorian A kuvaus kattaa kaikki PJ-verkkoon liitettävät tuotantolaitokset ja B kategoriaan kuuluvien yläraja on maksimissaan 1,5 MW, mutta tarkempi raja tulee olemaan myöhemmän päätöksen tulos (ENTSO-E 2012). Päätökseen vaikuttavat mm. kantaverkkoyhtiö, jakeluverkkoyhtiöt ja sääntelyviranomainen (ENTSO-E 2012). Verkkokoodiluonnos on edelleen työn alla ja siihen tulee muutoksia. Esimerkiksi vuoden 2011 lopussa yllä oleva määrittely oli vielä hiekkalaatua erilainen. Luokan B raja oli nimenomaan 1,5 MW ja loistehon säätövaatimuksia oli myös luokan A laitteille (ENTSO-E 2011). Mikäli seuraavissa aliluokissa käytäviin asioihin on otettu kantaa ENTSO-E:n luonnoksessa, on niitä tarkasteltu vain kategoriaan A kuuluvien tuotantolaitteistojen osalta. Tässä yh-

teydessä on oletettu, että kategorian B raja ei tipu 1,5 MW:sta niin alas, että sen määritykset alkaisivat koskea pientuotantoa, saati mikrotuotantoa.

Fingridin voimassa oleva *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset* (VJV2007) suosittelee VJV:tä sovellettavaksi määritellyn 10 MW:n lisäksi myös 1-10 MW:n tuotantolaitoksille. Loistehon säätövaatimuksia on asetettu 500 kVA:sta alkaen. (Fingrid 2007)

Tuotantolaitoksen käyttötavasta riippuvat sovellettavat sopimusehdot on esitetty taulukossa 4.1 (ET 2011a).

Taulukko 4.1. Sovellettavat sopimusehdot tuotantolaitoksen käyttötavan mukaan (ET 2011a).

		Luokka	Rinnan- käynnin esto	Tahdistus	Yhteen- sopivuus	LoM	Sopimus- ehdot
Yleisestä jakeluverkossa erossa käyvät tuotantolaitokset	Rinnankäyttö estetty mekaanisesti	1	X				LE05& VPE10
	Sähkön siirto jakeluverkkoon estetty	2		X			LE05& VPE10
Yleiseen jakeluverkkoon syöttävät tuotantolaitokset	Tuotetulle sähkölle ei ole ostajaa	3		X	X	X	LE05& TVPE11
	Tuottaja myy sähköä sähkömarkkinaosapuolelle	4		X	X	X	LE05/ TLE11& TVPE11

Sähkön laatuun ottavat kantaa myös sähkömarkkinalaki ja ET:n suosittelemat liittymis-/verkkopalveluehdot (Sähkömarkkinalaki 1995; ET 2011b). ENTSO-E:n verkkokoodien myötä maakohtaisien vaatimusten lajitelman tulisi selventyä vuonna 2014 julkaistavan Eurooppalaisen verkkokoodin myötä. Heikkoutena ovat nykyisellään myös monet erilaiset teholuokat, joiden perusteella on tehty lajittelua. Työn alussa määritelty teholuokkajako tulee säilymään työn loppuun saakka huolimatta tässä kappaleessa esille tulevista muista tehoportaista. Seuraavissa aliluvuissa käydään läpi tarkemmin mikro- ja pientuotantolaitokselta

vaadittavia teknisiä ominaisuuksia, joita luetelluissa liittämiseen liittyvissä ohjeissa ja määräyksissä on käsitelty. Lisäksi tarkastellaan, mitä ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa on sanottu näihin liittyen, kategorian A osalta.

4.1.1 Sähkötyöturvallisuus

Tuotantolaitteistoilta vaaditaan SFS 6002:n mukaan erottaminen erotuslaitteella, sulakkeiden poistamisella tai muulla luotettavalla tavalla. Lisäksi erotuslaitteessa on oltava näkyvä erotusväli tai asennonosoitus, tai toiminta on muulla tavoin luotettavasti todettava. Erotuslaite on oltava lukittavissa ja sinne on oltava esteetön pääsy tai kaukokäyttömahdollisuus. Lisäksi korjaus ym. tapauksissa kohde on työmaadoitettava, pientuotantolaitteistojen tapauksessa mielusti työkohteen molemmin puolin takasyöttöriskin takia. Kohteet, joissa voimalaitosta voidaan käyttää varavoimana (saarekkeessa), on varustettava vaihtokytkimellä. Asennuksen ja käyttöönoton saa tehdä vain siihen tarvittavat luvat omaava henkilöstö ja suojausasettelujen muutoksesta tulee tarvittaessa tehdä uusi käyttöönototarkastus. (SFS 6002; ET 2009; ET 2011a)

4.1.2 Sähkön laatu

Sähkön laatu käsitteenä ei rajoitu pelkästään jännitteen laatuun. Kuvassa 4.1 on esitetty sähkön laatuun vaikuttavia osatekijöitä.



Kuva 4.1. Sähkön laadun muodostuminen eri osatekijöistä. (Partanen et al. 2010)

Sähkönjakelun luotettavuudella tarkoitetaan toimintavarmuutta, käyttövarmuudella jakeluverkon käytettävyyttä ja näillä yhdessä toimitusvarmuutta (Partanen et al. 2010). Sähköä saadaan toimitettua, mikäli edellä mainitut toteutuvat samalla ajanhetkellä. Se, minkä laatuista sähkö on, riippuu mm. kuvan 4.1 vihreän ympyrän ympärillä olevista asioista. Sähkön laatu ei siis tarkoita pelkästään jännitteen laatua.

Pientuotannolla voidaan vaikuttaa myös toimitusvarmuuteen, mutta tässä tapauksessa asiakas pääsee vaikuttamaan siihen itse, eikä sähköä sinällään ”toimiteta” mihinkään. Tähän asti luotettavuuteen ovat vaikuttaneet verkkoyhtiön verkostoinvestoinnit ja huoltotoimenpiteet. Entistä omavaraisempi sähkön tuotanto lisääisi sähkön käyttövarmuutta, mutta ei verkon luotettavuutta. Nykyisellään sähkökatkon kokemisaikaa voidaan lyhentää varavoimageneraattoreilla, mutta katkoa ei voida kokonaan välttää. Sähkökatko näkyy asiakkaalle ainakin sen aikaa, että käännetään vaihtokytkin ”varavoima”-asentoon, tai automatiikkakäynnistyksen viiveen ajan. Vaihtelevasti tehoa antava tuotantomuoto vaatii rinnalleen akkukapasiteettia tasaamaan tuotannon ja kulutuksen eroa tai vaihtoehtoisesti jonkun muun älykkään ohjausjärjestelmän. Ensin tulee kuitenkin selvittää mm. suojausteknisiä haasteita, jotta pientuotantolaitokset eivät vaikuttaisi negatiivisesti käyttövarmuuteen ja aiheuttaisi laajempia vikoja kuin mitä vika itsessään. Koska Suomessa noin 90% asiakkaan kokemista sähkökatkoista johtuu KJ-verkon viroista, olisi omavaraisella tuotannolla mahdollisuus parantaa käyttövarmuutta. Tähän liittyvät myös toimitusvarmuustunnusluvut, mutta pientuotannon mahdollisista vaikutuksista niihin, ei oteta tässä yhteydessä kantaa.

Jännitteen laatuun ottaa kantaa standardi SFS-EN 50160 *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet* (SFS-EN 50160). Standardi ei ole jännitteen laadun kannalta erityisen tiukka. Jakelujännitteen tulee säilyä liittämiskohdassa mikrotuotantolaitoksesta huolimatta edellä mainitun standardin mukaisena ja harmonissärö saa olla enintään 8% (ET 2009). Lisäksi liitettävän laitoksen on siedettävä EN-61000-6-1:n mukaisesti verkkohäiriöitä (jännitemuutoksia ja har-

monisia) eikä se saa itse syöttää verkkoon päin EN-61000-6-3 standardissa määriteltyjä raja-arvoja enempää (ET 2009). Liityntä tapahtuu useimmiten tehoelektronikan avulla, joka tarkoittaa jännitteen säröytymistä. Suodatuksella voidaan vaikuttaa särötasoon. Liitteessä III on kooste standardissa SFS-EN 50160 määritellyistä jännitteen laadun kriteereistä. Yleisesti voi sanoa, että tuotantolaitos ei saa heikentää sähkön laatua, jota tulee tarkastella sekä liityntäpisteen että tuotantolaitoksen laatuvaikutusten näkökulmasta (ET 2009; ET 2011a). Tuotantolaitoksen tulee täyttää SFS:n kansallisissa ja IEC:n ja CENELEC:n kansainvälisissä standardeissa asetetut määräykset (ET 2011a). Yli 50 kVA:n tuotantolaitoksille todetaan lisäksi, että verkonhaltija määrittää kriteerit sallituille häiriötasoille (ET 2011a). Sähkötuotantolaitoksen haltija on vastuussa, mikäli tuotettu sähkö ei ole standardien mukaista (ET 2011a).

Jännitteen laatuun vaikuttaa liitettävän laitoksen lisäksi verkon jäykkyys. Mitä heikompi verkko ja suurempi yksikkö kaukana syöttävästä jakelumuuntajasta, sitä enemmän se voi yksistään vaikuttaa jännitteeseen. Jännitteenousu on rinnastettavissa jännitteenalenemaan ja sitä voidaan arvioida vastaavalla yhtälöllä

$$\Delta U = \frac{P_N}{U^2} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \tan \varphi) \quad (4.1)$$

kuin jännitteenalenemaakin, missä P_N on tuotantolaitoksen nimellisteho, R tuotantolaitoksen liittymispisteen ja jakelumuuntajan välisen johdon resistanssi, X vastaavan johto-osuuden reaktanssi, U alkupään jännite ja $\cos \varphi$ tuotantolaitoksen tehokerroin (Lakervi & Partanen 2008). Prosentuaalinen muutos on yhtiökohtaisesti määriteltävissä, mutta ET:n suositus on 4% PJ-verkon osassa, jossa on muitakin asiakkaita (ET 2011a).

Käynnistyksen ja verkosta irtoamisen on aiheuttamaan jännitemuutokseen on käytetty yhtälöä

$$S_N = \frac{3 \cdot I_K \cdot U_v}{25 \cdot i_{\text{suhde}}}, \quad (4.2)$$

missä S_N on tuotantolaitoksen nimellisteho, I_K on verkon oikosulkuvirta (suunnitteluarvo 250 A) ja U_v vaihejännite 230 V ja i_{suhde} voimalaitoksen liittymistavasta riippuva, kytkentävirran suhde nimellisvirtaan (Sener 2001). Jos tuotantolaitos ei ota nimellisvirtaansa enempää käynnistysvirtaa ($i_{\text{suhde}}=1$) jää jännitteenmuutos tällöin neljään prosenttiin. Yhtälöä voi käyttää ainakin suuntaa-antavana, mutta absoluuttisesti noudatettuna sillä voi nykyään saada turhan pessimistisiä tuloksia. Verkkoon liittyminen on tapahduttava tahdistetusti, jolloin ainoastaan irtoaminen voisi aiheuttaa jännitemuutoksen. Useamman tuotantolaitoksen liittyessä samalle johdolle, voi jännitemuutos olla suurempikin, jos irtoamiset tapahtuvat samanaikaisesti. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä, ellei irtoaminen johdu seuraavassa luvussa esitetyistä ali-/ylijänniteasetteluista, jolloin 4%:n muutos on jo tapahtunut muutenkin.

ENTSO-E:n pilottikoodissa sanotaan, että tuotantolaitokset eivät saa heikentää liittymispisteen sähkön laatua niille määrätystä arvoista ja että verkkooperaattori voi määrittellä sähkön laatuvaatimuksia, jotka ovat linjassa kansallisten ja kansainvälisten määräysten kanssa. Aiempi luonnos ohjeisti noudattamaan EN 50160 standardia joten verkkokoodi ei ilmeisesti pyri ottamaan kantaa sähkön laatuun. (ENTSO-E 2011; ENTSO-E 2012)

4.1.3 Tuotantolaitoksen suojaus

Tässä luvussa käydään läpi mikro- ja pientuotantolaitosten suojausvaatimuksia. Standardissa SFS-EN 50438 on esitetty raja-arvot, joiden rajoissa mikrotuotantolaitos voi liittyä, tai mikrotuotantolaitoksen on irrottava verkosta, mutta näiden asetteluarvojen tiukkuuden takia on standardiin julkaisemisen jälkeen tehty suomalainen lisäys, jossa vaatimuksia on löysennetty. Vastaavat vaatimukset on esitetty myös ET:n ohjeessa, jossa asetteluarvot pätevät alle 50 kVA:n tuotantolaitoksille, mutta verkonhaltijalla on oikeus poiketa niistä tapauskohtaisesti. Verkosta on irrottava minkä tahansa parametrin ylityksestä tai alituksesta. Verkkoon

saa liittyä, jos jännite ja taajuus ovat olleet suojausasetteluiden rajoissa vähintään 3 minuuttia generaattoreiden tapauksessa ja vaihtosuuntaajilla liittyvät 20 sekuntia. Synkronoinnin on oltava automaattista. Suojauksessa käytetään yli-/alijännite, yli-/alitaajuusreleitä ja LoM-suojia. Asetteluarvot (myös ENTSO-E) on esitetty taulukossa 4.2. (SFS-EN 50438; ET 2011a)

Taulukko 4.2. Mikrotuotannolle standardissa SFS-EN 50438 määritetyt löysennetyt (= ET:n ohjeessa alle 50 kVA:n tuotantolaitoksille esitetyt) ja ENTSO-E:n luonnoksessa määritetyt tuotantolaitoksen suojauksen asetteluarvot. (SFS- EN50438; ET 2011a; ENTSO-E 2012)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo	ENTSO-E
Ylijännite	0,2 s	$U_N + 10\%$	-
Alijännite	0,2 s	$U_N - 15\%$	-
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz	51-51,5 Hz, 30min
Alitaajuus	0,2 s	48 Hz	47,5-48,5 Hz, 30min
			48,5-49 Hz, *
LoM	max. 5 s		

* Maakohtainen, mutta vähintään 30 min.

Erottaminen on tehtävä mekaanisilla kontaktoreilla tai elektronisilla kytkimillä (ET 2009). Vian jälkeen liittyminen on suositeltavaa toteuttaa porrastetusti, jos tuotantolaitoksia on useampia (ET 2009). Yli 500 kVA:n tuotantolaitteistoille rajat määritellään tapauskohtaisesti (ET 2011a). ENTSO-E:n verkkokoodissa ei oteta kantaa jännitteisiin, mutta taajuuden osalta on asetettu taulukossa näkyvät vaatimukset, joista on nähtävissä, että tuotantolaitteiston on verkosta irtoamisen sijaan tuettava verkkoa taajuuspoikkeamien aikana (ENTSO-E 2012). Lisäksi todetaan, että mikäli vaatimuksia on tarpeen tiukentaa, voidaan kansallisesti niin tehdä (ENTSO-E 2012). Yksittäisten tuotantolaitosten osalta ei muodostu ongelmaa, vaikka tuotantoyksikkö irtoaisikin yhdestä rajasta, kuten Suomessa ET:n suosituksen mukaan. Jyrkkä raja voisi aiheuttaa ongelmia, jos verkkoon liitetyn pientuotannon määrä olisi huomattava.

4.1.4 Saarekekäytön esto

Vikatilanteessa (Loss of Mains, LoM), pientuotantolaitos ei saa jäädä syöttämään verkkoa tai muodostuvaa saarekettä. Syitä ovat mm. seuraavat:

- Tuotannon ja kulutuksen tasapainosta ei ole mitään takuita, jolloin saarekkeen tai verkon osan jännite ja taajuus voi olla mitä tahansa → laiterikon riski
- Työhenkilökunnalle muodostuu turvallisuusriski, takasyötön vaara
- Verkon jännitteen palatessa ei voida taata tahdistumista, saareke voi käydä eri tahdissa kuin jännitteelliseksi palaava verkko, mistä voi seurata jännitekuopan aiheuttama jälleenkytkentä. Asynkroninen kytkentä ei ole myöskään hyväksi laitteistolle sähköisten tai mekaanisten transienttien vuoksi ja on sitä riskialttiimpi, mitä suuremmalla vaihe-erolla kytketään.
- Saarekkeen sisäiset ongelmat
 - Muodostuvan saarekkeen suojaus
 - Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria
 - Kuormien kytkemisen aiheuttamat heilahtelut
 - Vaihtelevan tuotannon aiheuttamat heilahtelut

Tärkein syy saarekekäytön estoon on sähköturvallisuus sillä verkko ei saa olla jännitteellinen, kun sen oletetaan olevan jännitteetön syöttävän verkon puolelta. Saarekekäyttö voi syntyä vian tai minkä tahansa kytkin- tai katkaisijatoiminnon seurauksena. LoM-suojaukseen liittyy kuitenkin ongelmia. Jännite- ja taajuusreleillä (yli-/ali-) toteutettava suojaus perustuu tuotantolaitteiston kyvyttömyyteen syöttää muodostuvaa saarekettä, jolloin taajuus ja jännite romahtavat ja suojaus toimii. Vastaava muutos näkyy ylituotantotilanteessa nousevana jännitteenä ja taajuutena. Pelkillä taajuus- tai jännitereleillä ei kuitenkaan aina voida taata oikein toimivaa suojausta, jos muutokset tapahtuvat hitaasti tai kuormat vastaavat tuotantoa riittävän hyvin. Jos suojaus ei havaitse muodostuvaa saarekettä, puhutaan Non-Detection Zonesta (NDZ). (Mäki 2007)

Muita käytössä olevia toteutustapoja ovat mm. verkon impedanssin tai taajuuden muutosnopeuteen (ROCOF) perustuvat releet. Käytettävä suojausmetodiikka riippuu maasta. Koska syöttävä pientuotantolaitos voi aiheuttaa PJK:n epäonnis-

tumisen, vaaditaan LoM-suojaukselta nopeaa toiminta-aikaa. Useat laitevalmistajat näkevät ROCOF-releen ainoana mahdollisena suojausmenetelmänä nopean toimintavaatimuksen vuoksi (Lehto 2009). ET suosittelee käytettäväksi LoM-suojaukseen ROCOF-relettä, jonka toiminta-aika on 0.15 s ja esittää PJK:n toiminta-ajan pidentämistä 0.15 sekunnilla, mikäli ongelmia esiintyy lyhentyneen jännitteettömän ajan ($0,5s - 0,15s = 0,35s$) seurauksena (ET 2009). Toimintaraja on $\frac{df}{dt} = \frac{1 \text{ Hz}}{1 \text{ s}}$ (ET 2009). Uudemmassa ET:n ohjeessa LoM-suojauksen toiminta-aika on sama 5 s kuin taulukossa 4.2 esitetty ja yli 50 kVA:lle asetteluarvo on tapauskohtainen (ET 2011a). ROCOF:n heikkoutena on turhien irtoamisten riski, joiden seurauksena asettelusta tulee herkkyyden ja toimintavarmuuden kompromissi. Tällöin worst-case scenariossa suojaus ei toimi ja paremman suojausmenetelmän tarve on ilmeinen (Mäki 2007). ENTSO-E:n pilottikoodissa sanotaan, että tuotantolaitos saa irrota alle 2 Hz/s taajuusvaihtelusta vain LoM-suojauksen irroittamana ja mittaus on tehtävä 100 ms keskiarvoina (ENTSO-E 2012).

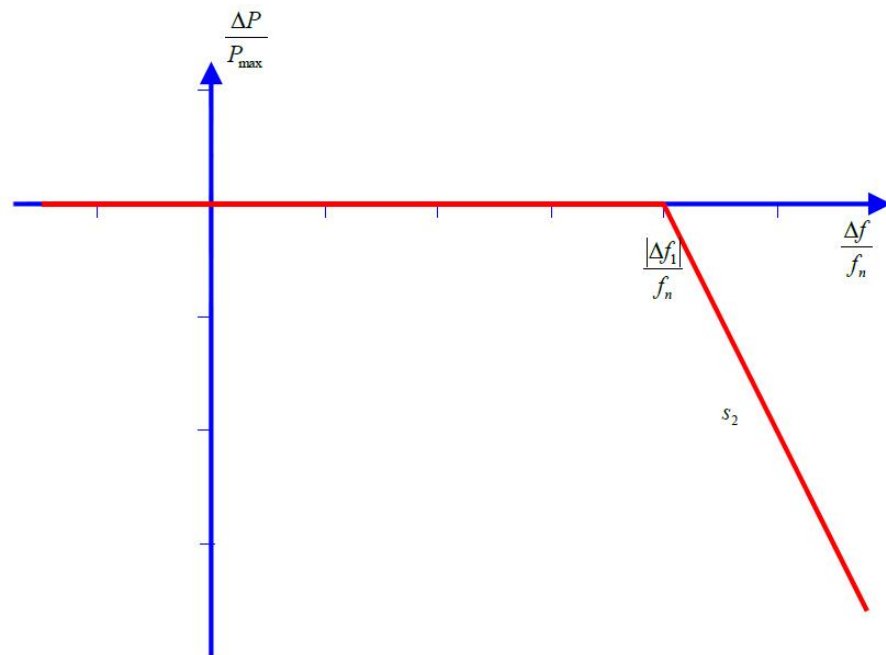
Saarekekäyttöön liittyy ongelmien lisäksi myös mahdollisuuksia. Tulevaisuudessa saarekkeet voisivat toimia vikatilanteiden aikana, jolloin asiakkaalle koituvaa haittaa jäisi pienemmäksi ja asiakkaiden sähkökatko voitaisiin jopa välttää kokonaan. Tähän liittyvät myös microgridit, mutta aihepiirin laajuuden vuoksi niihin on mahdotonta ottaa kantaa tässä yhteydessä tarkemmin. Tällä hetkellä intressi on estää saarekekäyttö tarpeeksi nopeasti ja luotettavasti ilman virheellisiä irtoamisia. Edellisen lauseen vaatimukset ovat ristiriidassa keskenään. Sähköturvallisuuden vuoksi tavoitteesta ”ilman virheellisiä irtoamisia” joudutaan joutumaan.

4.1.5 Voimalaitosten säätö

Mikrotootantolaitosten verkkoon liittämistä koskevassa standardissa SFS-EN 50438 todetaan, että tuotantolaitoksen tehokertoimen on normaalitilassa, tuotantotehon ollessa yli 20% nimellisestä, oltava välillä 0.95_{ind} ja 0.95_{kap} (SFS-EN 50438). Varsinaista säätöä ei edellytetä, mutta tehokertoimen on oltava

yllä mainitulla välillä. Yleensä tuotantoyksiköitä pyritään ajamaan tehokertoimella yksi. Järjestelmäteknisiä vaatimuksia (taajuus/jännitetoiminta-alue) on esitetty yli 500 kVA:n tuotantolaitoksille ja yli 10 MVA:n tuotantoa koskevat Fingridin VJV:n vaatimukset (Fingrid 2007).

ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa taajuuden säätöön on osallistuttava kaikkien A-kategorian yksiköiden kuvan 4.2 mukaisesti.



Kuva 4.2 Taajuussäätöön osallistuminen pilottikoodin mukaisesti ylitaajuustilanteessa. P_{\max} on tuotantolaitoksen maksimipäteho, ΔP vaadittu pätehoon muutos Δf :n suuruisesta taajuusmuutosta kohden. f_n on nimellistaajuus, 50 Hz. (Muokattu lähteestä: ENSTO-E 2012)

Tämä koskee siis tuotantolaitoksia heti 400 W:sta alkaen (ENTSO-E 2012). Ylitaajuus riippuu verkko-operaattorin määrittämästä rajasta, joka voi olla välillä 50.2-50.5 Hz ja tuotetun pätehoon vähennysvaatimus voi olla 2-12% (ENTSO-E 2012). Tällä vältetään ns. 50.2 Hz ongelma, joka pääsi syntymään Saksassa, kun vaatimuksena oli välitön verkosta irtoaminen taajuuden ylittäessä 50.2 Hz.

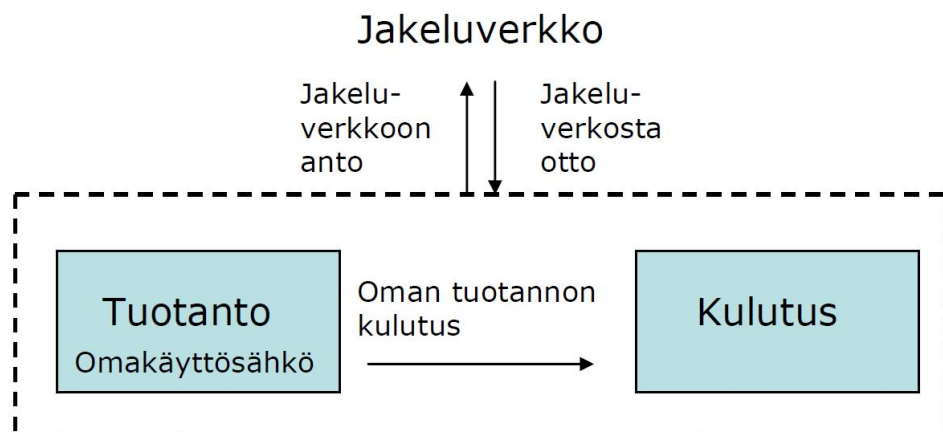
ENTSO-E:n luonnoksessa sanotaan, että verkko-operaattorilla on oikeus asettaa loistehon säätövaatimuksia. Todennäköisesti tehokertoimen säätö muodostuu yksinkertaisuudessaan eniten käytetyksi menetelmäksi. ENTSO-E:n luonnokses-

sa esitetyt vaatimukset ovat edelleen luonnoksen vaatimuksia ja voivat muuttua ennen virallista julkaisua. Vaatimukset ovat muuttuneet mm. luonnoksen edellisestä versiosta, jossa oli annettu loistehon toimintaikkuna. Luonnoksen sisältöä on hyvä tarkastella jo etukäteen, mutta liian nopeita johtopäätöksiä siitä ei kannata vetää, kuten muutoksista luonnoksen eri versioiden kesken voidaan todeta. (ENTSO-E 2012; ENTSO-E 2011)

4.1.6 Mittaus

Verkolle liityntäpiste voi näyttäytyä sähkön kulutuspiirteenä, sähkön tuotantopiirteenä ja näiden ajallisesti vaihtelevana kombinaationa. Yleensä käyttöpaikat, joissa on pieni määrä mikrotuotantoa, näkyvät vain kulutuspaikkana. Tällöin, jos sähkön siirtoa verkkoon päin ei ole, voidaan käyttää yhdensuuntaista, kulutusta mittaavaa mittaria (ET 2009).

Enintään 3x63 A kohteissa, joista sähköä myydään markkinoille, voidaan käyttää yhtä mittaria, jolla tulee mitata erikseen verkosta otettu ja verkkoon syötetty sähkö. Yli 3x63 A kohteissa, joista sähköä myydään markkinoille, on käytettävä kahta mittaria. Verkosta otetun sähkön ja verkkoon syötetyn sähkön lisäksi on mitattava oman tuotannon kulutus, joka saadaan vähentämällä tuotetusta sähköstä verkkoon syötetty sähkö ja laitoksen omakäyttösähkö. Tilannetta havainnollistaa kuva 4.3. (ET 2009)



Kuva 4.3. Kuvassa on esitetty katkoviivalla rajattuna käyttöpaikka, jossa on tässä tapauksessa myös omaa tuotantoa. Yli 50 kVA:n tuotantolaitosten tapauksessa oman tuotannon kulutus on verotettavaa. Jakeluverkon haltija toimii katkoviivalla rajatun laatikon ulkopuolella ja asiakas/sähkönkäyttäjä laatikon sisäpuolella. (ET 2011a)

Verkonhaltija omistaa mittarin ja lukee verkosta otetun ja verkkoon syötetyn sähkön. Itse tuotetun sähkön kulutuksen mittaamisesta vastaa sähkön tuottaja. Tuotannon ja kulutuksen netottaminen on kiellettyä. (ET 2009)

Sähkömarkkinalaki ei tunne tilannetta, jossa verkkoon syötetylle sähkölle ei ole ostajaa (Sähkömarkkinalaki 1995). On kuitenkin sovittu, että verkkoyhtiö voi joustaa asiassa, kunnes asia ratkeaa muulla tavoin, kuten lainsäädännöllä (Lehto 2009). Mikäli ylituotantoa halutaan syöttää verkkoon, ilman, että sähkölle on ostajaa, voidaan verkkopalveluehtojen (VPE) lisäksi soveltaa tuotannon verkkopalveluehtoja (TVPE) (ET 2009). Toimintamallia voidaan soveltaa, kun laitokset ja niiden lukumäärät ovat pieniä. Tarkempi byrokratia mittauksesta ja asiakkaalle koituvista kustannuksista jätetään tässä työssä käsittelemättä, mutta lisätietoa löytyy ainakin ET:n verkostosuosituksista ja suurimpien verkkoyhtiöiden sivuilta löytyvistä liittämisohjeista.

4.2 Liittämistekniikat

Hajautetun tuotannon liityntätavat voidaan jakaa periaatteessa kahteen kategoriaan:

- 1) Suoraan verkkoon liittyvät; epätahti- ja tahtigeneraattorit
- 2) Tehoelektroniikan välityksellä liittyvät tuotantoyksiköt

Tahti- ja epätahtigeneraattorit ovat pyöriviä koneita, joiden verkkovaikutukset ovat huomattavan erilaiset verrattuna tehoelektroniikan välityksellä liittyviin. Pienimpiä tuotantoyksiköitä liitetään useimmiten taajuusmuuttajan tai verkkovaihtosuuntaajan välityksellä, kun taas isommat ovat pyöriviä tahti- tai epätahtigeneraattoreita. Joissain tapauksissa liityntä voi olla myös muuntajan välityksellä, jos pieniä tuotantolaitteistoja on useampia. Verkkovaihtosuuntaajan tekniikka ja ominaisuudet käydään tarkemmin läpi omassa kappaleessaan 4.3.

Epätahtigeneraattori käy nimensä mukaan eri tahtiin kuin verkko. Generaattorina toimiessaan oikosulkukone käy verkon synkroninopeutta edellä. Ne voidaan jakaa vielä oikosulkugeneraattoreihin (vakionopeuskäytöt) ja liukurengasgeneraat-

toreihin (muuttuvanopeuksiset). Muuttuvanopeuksisissa käytöissä voidaan käyttää kaksoissyöttöä, jossa roottori on kytketty verkkoon taajuudenmuuttajan välityksellä ja staattori suoraan. Epätahtigeneraattorit ovat halvempia kuin tahtigeneraattorit ja niitä käytetään yleensä pienemmissä tuotantolaitoksissa rinnankäytössä. Esimerkiksi pienvesivoimalaitoksissa ja tuulivoimaloissa käytetään epätahtigeneraattoreita (Kinttula 2008). Epätahtigeneraattori vaatii toimiessaan loistehoa, joka tuotetaan joko paikallisesti kompensointikondensaattorilaitteistolla, tai otetaan verkosta. Loistehon verkosta ottaminen ei ole kannattavaa, sillä se lisää verkon häviöitä, jännitteenalenemaa ja vaikuttaa tarvittavan liittymän kokoon (Kinttula 2008). Epätahtigeneraattorit poikkeavat tahtigeneraattoreista myös oikosulkutilanteissa. Niiden kyky syöttää vikavirtaa on ongelmallinen verkon kannalta. Alkutilassa vikavirta voi olla moninkertainen nimelliseen verrattuna, mutta esim. kolmivaiheisessa viassa verkon jännite romahtaa nopeasti magnetoinnin hävitessä. Yhtälössä (3.2) esiintyvä i_{suhde} on epätahtigeneraattoreilla luokkaa 3...8 (Sener 2001). Käynnistysvirtaa pehmokäynnistimin rajoittamalla voidaan liittää verkkoon nimellisteholtaan huomattavasti suurempi laitos tai vaihtoehtoisesti pienempi laitos ”pehmeämpään” verkkoon (Sener 2001).

Tahtigeneraattoreiden käyttökohteita ovat niin suuret, hitaasti pyörivät generaattorit valtakunnan verkossa, kuin pienet muutaman kVA:n varavoimakoneetkin. Tahtigeneraattorit voivat epätahtigeneraattoreista poiketen toimia joko yli- tai alimagnetoituina ja vaikuttaa näin ollen loistehoon ja jännitteeseen. Tahtigeneraattori ei myöskään tarvitse ulkopuolista verkkoa toimiakseen, jonka takia LoM-suojaukseen on erityisesti kiinnitettävä huomiota (Lehto 2009). Verkkoon liittyminen on suoritettava tahdistettuna. Tahdistamiseen tarvitaan erillinen tahdistuslaitteisto. Tahtigeneraattorin käyttäytyminen vikatilanteissa eroaa oikosulkugeneraattorista. Vikavirta voi kasvaa yli kymmenkertaiseksi vian alkuhetkellä, kunnes se vaimenee alku- ja muutostilan reaktanssien seurauksena pysyvän tilan arvoon ja jää syöttämään vikavirtaa.

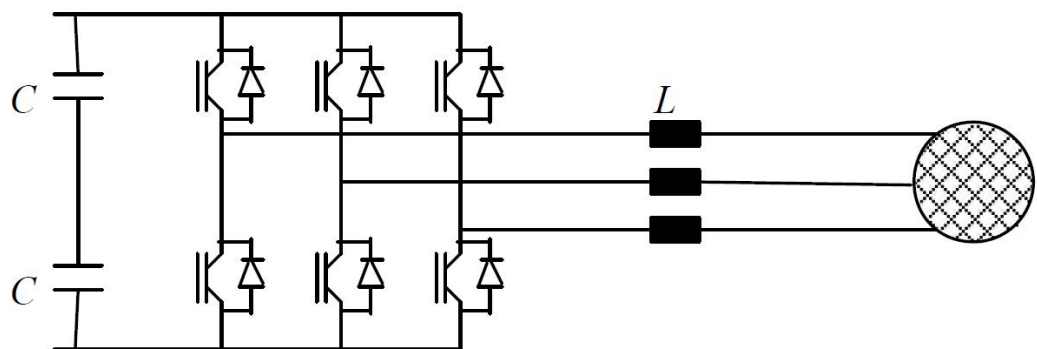
4.3 Verkkovaihtosuuntaajan ominaisuudet ja tekniikka

Tässä luvussa käsitellään verkkovaihtosuuntaajaa (VVS) pientuotantolaitoksen liittymistekniikkana. VVS:aa päätettiin tarkastella generaattoreita omana lukuun, koska se on tärkein hajautetun tuotannon liityntätapa. Eräs verkkovaihtosuuntaajan käytön syy on tasavirtaa tuottavat tuotantoyksiköt kuten aurinkopaneelit ja polttokennot. Muuttuvanopeuksiset tuulivoimakäytöt ja korkeampikierroslukuiset tuotantoyksiköt (mikroturbiinit) vaativat myös suuntaajan, jota voidaan kutsua myös taajuusmuuttajaksi (VTT 2009).

Termiä verkkovaihtosuuntaaja käytetään usein sekavasti eri yhteyksissä. Verkkovaihtosuuntaajalla tarkoitetaan suuntaajasiltaa, joka muuttaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi, tai tarvittaessa päinvastoin ja joka toimii verkon näkökulmasta jänniteohjattuna virtalähteenä. Aliluvuissa käydään lyhyesti läpi VVS:n toimintaperiaate ja tekniikka, kyky osallistua vikatilanteisiin sekä vaikutus sähkön laatuun.

4.3.1 Verkkovaihtosuuntaajan tekniikka

Verkkovaihtosuuntaaja muuttaa syöttävän tasajännitteen vaihtojännitteeksi. Kuvassa 4.4 on esitetty yleisimmin käytetyn, kaksitasoisen jännitevälipiirillisen verkkovaihtosuuntaajan piirikaavio ja L-verkkosuodin (Peltoniemi 2005).

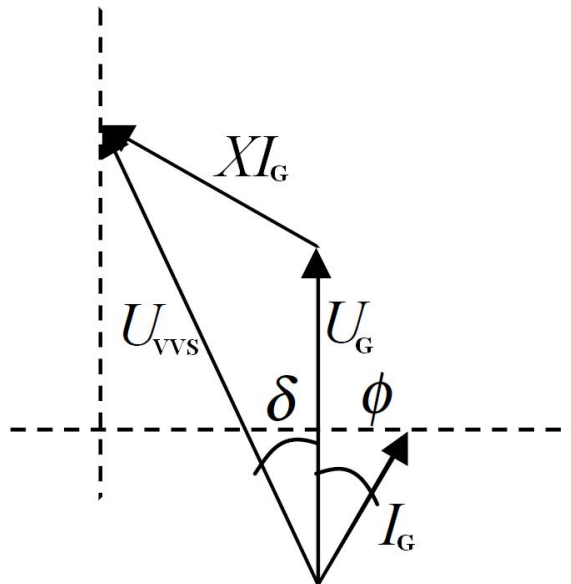


Kuva 4.4. Kaksitasoisen, jännitevälipiirillisen verkkovaihtosuuntaajan piirikaavio (Peltoniemi 2005)

Kytkimet ovat IGBT-komponentteja. Käyttämällä vastaavanlaisia diodien ja transistorien vastarinnankytkentää välipiirin tulopuolella, voidaan samalla kytkennällä ajaa tehoa myös toiseen suuntaan (Peltoniemi 2005). Tehonsiirto verkkoon perustuu tehokulmayhtälöön

$$P = \frac{U_{vvs} \cdot U_G}{X} \cdot \sin \delta, \quad (4.3)$$

missä U_{vvs} on VVS:n lähtöjännite, U_G verkon jännite, $X = \omega L$, missä L on verkko-suotimien induktanssi ja kulma δ U_G :n ja U_{vvs} :n välinen kulma. Alla oleva vektoripiirros havainnollistaa tilannetta.



Kuva 4.5. Verkkovaihtosuuntaajan vektoripiirros (Muokattu lähteestä: Peltoniemi 2005)

Kytkinohjeina käytetään jotain PWM-menetelmää, kuten sini-kolmiovertailua tai vektorimodulointia (Peltoniemi 2005). Mikäli verkon jännite häviää, ei yhtälössä (4.3) ole enää kulmaeroa, jolla tehoa siirrettäisiin. Verkon jännitteen pienentyminen edellyttää tehokulman δ pienentymistä tai virran I_G kasvattamista tai U_{vvs} :n pienentämistä. I_G :tä ei voida kasvattaa yli virtarajan, eikä δ tai U_{vvs} pienentää, jollei VVS:n DC-piiriä syöttävän lähteen tehoa pienennetä. VVS valvoo lähtövirran lisäksi yleensä DC-piirin jännitettä, johon vaikuttaa syöttävän lähteen teho. Näitä ominaisuuksia voidaan soveltaa myös LoM-suojaukseen.

4.3.2 Vikatilanteisiin osallistuminen

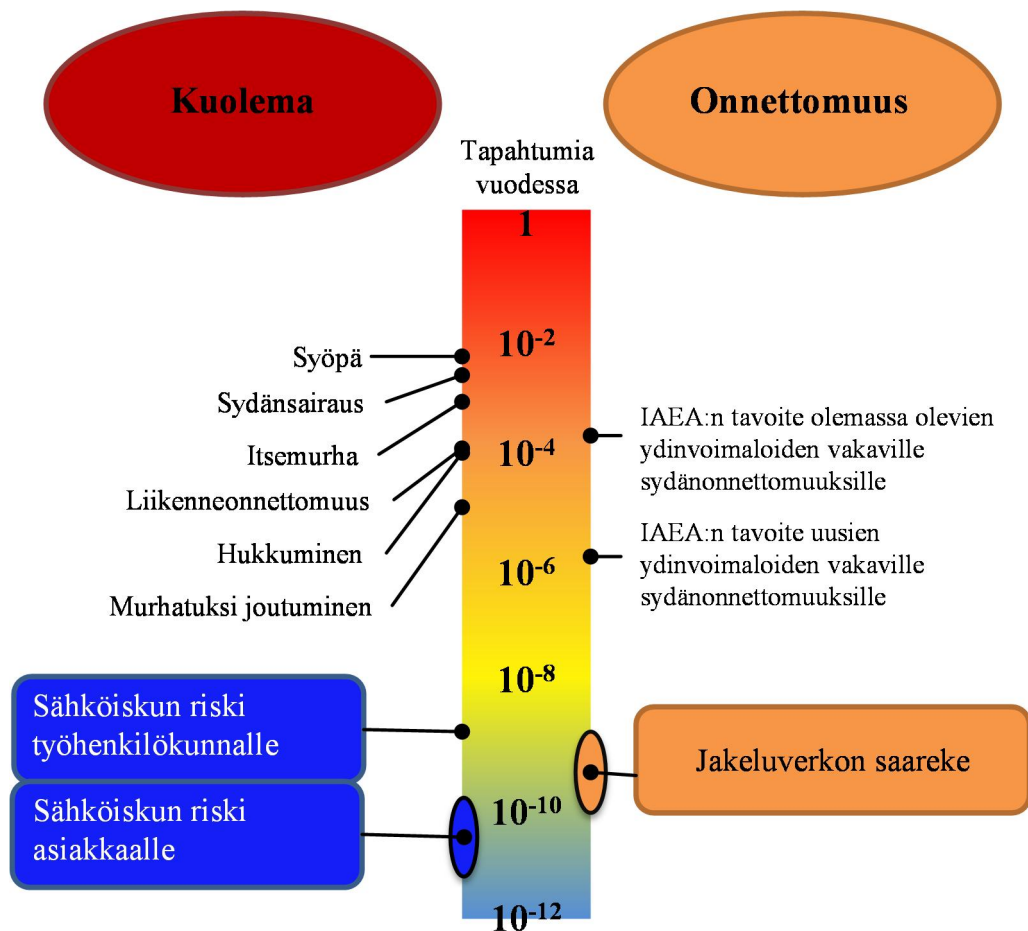
Vikatilanteissa VVS:n kykyä syöttää vikavirtaa rajoittaa suuntaajasillan virtaraja, joka määräytyy kytkinkomponenttien kestoisuudesta. Tyypillisesti vikavirta on korkeintaan kaksinkertainen nimellisvirtaan nähden, eli noin 10...20% vastaavan tahtikoneen vikavirrasta. Vikavirran syöttökyvyn kasvattaminen nostaa nopeasti suuntaajan hintaa, koska se edellyttää kytkinkomponenttien ylivoimittamista. Tässä työssä arvona on käytetty $i_{\text{suhd}}=1.2$. Monipuolisten suojausominaisuuksien, kuten yli-/alitaajuus-, yli-/alijännite-, ylivirtasuojaus, LoM-suojaus, maasulkusuojaus ansiosta VVS periaatteessa sisältää tarvittavat ominaisuudet tuotantoyksikön liittämiseksi ilman erillisiä suojalaitteita. Myös lukittavalla erotusvälillä olevia malleja on olemassa. Lisäksi tyypillisen VVS:n hyvänä puolena voidaan nähdä luontainen kyvyttömyys syöttää jännitteetöntä verkkoa. VVS pystyy jäämään syöttämään saareketta, mikäli hetkellä, jolloin verkon jännite katoaa, vastaavat kuormat lähes täydellisesti VVS:n tuotantoa. Toisin ilmaisuna, hetkellä, jolloin jännite katoaa, tulisi verkosta otetun tehon olla nolla. Tällöin kuorman impedanssit muodostaisivat VVS:lle vastajännitteen. Toisaalta pienikin kuorman tai tuotannon muutos voi tällöin johtaa saarekkeen romahtamiseen, ellei tasapaino löydy taajuus- ja jännitesuojien asetteluarvojen sisältä. Näin siis mikäli erillistä LoM-suojausta ei olisi. Toisaalta aukotonta LoM-suojausta ei olekaan ja todennäköisyys saarekkeen syntymiselle on aina tapauskohtainen, Erillistä LoM-suojausmenetelmää käytettäessä saarekkeen syntymisen riski on kuitenkin hyvin pieni. Aihetta käsittelevissä lähteissä se on ollut luokkaa $< 1 \cdot 10^{-6}$ vuodessa (Verhoeven 2002; Ranade et al. 2007, Adrianti et al. 2011). Jotta saareke syntyisi, tulisi samalla hetkellä toteutua seuraavat reunaehdot:

- Verkon osan tuotanto ja kulutus vastaavat joka hetki lähes täydellisesti toisiaan (sekä P , että Q), jolloin taajuus, jännite sekä tehokulma pysyvät sallituissa rajoissa.
- Em. verkon osa irtoaa tai erotetaan muusta verkosta (vian seurauksena tai verkostotyön vuoksi)
- Mikään saarekkeen havainnointiin kykenevä aktiivinen tai passiivinen suojaus ei toimi

Suuntaajissa LoM-suojaukseen käytetään aktiivisia ja passiivisia menetelmiä. Passiivisia menetelmiä ovat mm. verkon ja DC-välipiirin jännitteiden sekä verkon taajuusmuutosten ja taajuuden muutosnopeuden seuraaminen. Aktiivisia menetelmiä ovat mm. ”vector shift” eli tehokulman aktiivinen heiluttelu ja muutosten suuruuden seuraaminen, sekä verkon impedanssin mittaaminen ja muutosnopeuden valvonta.

Saarekkeen aikainen sähköturvallisuusriski muodostuu pääosin siitä, että ihminen joutuu virtapiirin osaksi ilman että se johtaa kosketusjännitesuojauksen riittävän nopeaan toimintaan. Näin tapahtuu, jos ihmisen kytkeytyminen piiriin ei johda sellaiseen vikavirtaan tai vian aiheuttamaan muutokseen verkon jännitteessä ja taajuudessa, ettei tuotantolaitosten taajuus-, jännite-, ja ylivirtasuojaukset tai verkossa olevat vikasuojat (johdonsuojat, sulakkeet ja mahdolliset vikavirtasuojat) katkaise syöttöä riittävän nopeasti. Koska kaikkia kiinteistöjen PJ-verkkojen osia sekä julkista jakeluverkkoa ei ole suojattu vikavirtasuojilla, riippuu suojaus usein pelkästään riittävästä vikavirran syöttökyvystä. Sulakkeiden ja johdonsuojien riittävän nopean toiminnan varmistavaa vikavirran syöttöä ei voida taata mikrotuotannon varassa toimivissa saarekkeissa, jolloin verkon suojaus ei suurella todennäköisyydellä toimi riittävän nopeasti tai ollenkaan. Toisaalta on todennäköistä, että vika aiheuttaa sellaisen muutoksen tuotantolaitosten liityntäpisteiden jännitteessä ja saarekkeen taajuudessa (PJ-verkon viat vastaavat 1-, 2-, tai 3-vaiheisia kuormia) että tuotantoyksiköiden (suuntaajien) jännite- ja taajuus-suojaus havahtuu. Myös tuotantoyksiköiden ylivirtasuojaus voi laukaista, riippuen sovelletuista laukaisurajoista. Teoriassa on kuitenkin edelleen mahdollista etteivät tuotantolaitostenkaan suojaukset havaitse tilannetta. Saarekkeen syntyminen ja sen aikainen turvallisuusriski on teoriassa mahdollinen myös suuntaajasyötetyissä järjestelmissä, mutta kuinka teoreettinen tilanteen on oltava, jotta sitä ei nähdä ongelmaksi?

Kuvassa 4.6 on arvioitu saarekkeen aiheuttamaa sähköturvallisuusriskiä Japanissa.

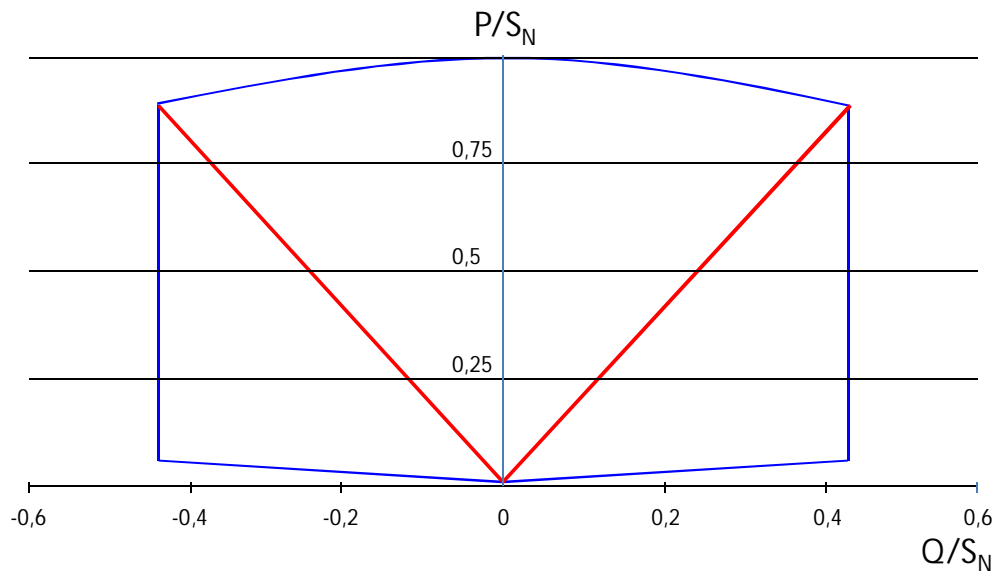


Kuva 4.6. Saarekekäytön riskiarvio suhteessa muihin kuolemansyihin/onnettomuuksiin Japanissa. (Muokattu lähteestä: Ehara 2009)

Japanissa sähköverkon rakenne ja tapaturmariskit ovat erilaiset, mutta kuvan avulla saa käsityksen riskin todennäköisyydestä suhteessa muihin onnettomuusriskeihin.

4.3.3 Vaikutus sähkön laatuun ja verkon tukeminen

VVS pystyy säätämään verkon puoleista jännitettä välipiirin sallimissa rajoissa. Ohjearvot tulevat mittaustiedoista verkon puolelta, joten VVS:llä saadaan näiltä osin positiivinen vaikutus jännitteen laatuun. Säätö voi olla ylituotantolanteessa taajuustukea pätehon alassäätönä tai jännitetukea loistehon ylös- tai alassäätönä. Kuvassa 4.7 on esitetty SMA:n verkkovaihtosuuntaajan PQ-karakteristika.



Kuva 4.7. Verkkovaihtosuuntaajan PQ-diagrammi. (Muokattu lähteestä: Nasr 2011)

Toiminta-alue voi tehokerroinsäädössä olla punaisten janojen sisäpuolella, joka tarkoittaa $0,9_{\text{ind}}$ tai $0,9_{\text{kap}}$ tehokerrointa (SMA 2011).

Perinteisesti jakeluverkossa ei ole ollut muuta säätöä kuin päämuuntajan käämi-kytkin, joten VVS toisi lisämahdollisuuden paikallisempaan jännitteensäätöön. VVS:n negatiivisena vaikutuksena voidaan nähdä tehoelektroniikan ja korkean kytkentätaajuuden vuoksi sen aiheuttamat harmoniset, joita on suodatettava VVS:n ja verkon välissä olevilla suotimilla. Tehoelektroniikan lisääntyminen verkossa aiheuttaa säröä ja nollavirtaa. Suodinvalinnalla voidaan vaikuttaa resonanssitaajuuksiin (VTT 2009). AMR-mittareilta on mahdollista saada tietoa sähkön laadusta, jolloin käyttöpaikkaan liitetyn VVS:n vaikutus olisi havaittavissa.

Periaatteessa VVS:n ja jonkun muun tukevan tuotantolähteen avulla voitaisiin ajaa saarekettä. Tällainen voisi onnistua käyttämällä kondensaattoriparistoa tai akustoa välipiirissä, osan VVS:sta toimiessa jännitelähteinä ja osan virtalähteinä. Tähän kuitenkin liittyy muodostettavan verkon heikkous, jolloin riittävän suuri ja nopea muutos voisi aiheuttaa jännitekuopan ja VVS:ien irtoamisen. (Lopes et al. 2006)

4.4 Osapuolet

Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi ns. päätoimijat, joita pientuotantolaitoksen hankkiminen koskee. Kappaleessa 3.4, käytiin läpi tulevaisuuden näkymiä. Siinä todettiin, että hajautettu tuotanto muuttaa nykyistä sähköenergiasektoria siten, että joidenkin osapuolien rooli tulee muuttumaan nykyisestä. Lisäksi toiminta luo markkinasaumaa uusille toimijoille.

4.4.1 Sähkön käyttäjä

Asiakkaan hankkiessa tuotantolaitoksen, tulee asiakkaasta myös sähkön tuottaja. Jos sähköä myydään jollekin ostajalle, on asiakas tällöin myös sähkön myyjä. Tuotantolaitokselle tarvitaan maa-alue tai muu rakennuskohde, rakennusluvut ja kenties tietyissä kohteissa ympäristölupa ja YVA-menettely. Verkkoyhtiöön on hyvä olla yhteydessä jo suunnitteluvaiheessa, ennen hankintapäätöstä. Polttoaine tulee useimmiten joko omasta takaa tai primäärienergiana luonnosta. Konsultointi- ja asiantuntijan suunnitteluapu voi tulla myös tarpeeseen lähtövaiheessa, kuten myös rahoituskin. Valtiolta voi saada tukia, kuten luvussa 3.2 esitettiin. Mikäli päädytään ostamaan tuotantolaitteisto, on laitevalmistaja seuraava toimija, jonka puoleen käännetään. Tuotantolaitteiston asennukseen tarvitaan päteviä asentajia, jotka myös suorittavat käyttöönottotarkastuksen.

Luetellut osapuolet muodostavat karkean listauksen toimijoista, joiden kanssa asiakas voi olla tekemisissä. ET:n ohje ”*Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon*” on suunnattu erityisesti pientuotantolaitteiston hankkijalle, jossa on selkeästi annettu ”etenemiskaavio” ja kuvattu tarkemmin kuhunkin toimenpiteeseen liittyviä asioita (ET 2011a). Myös ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa on asetettu toimintaohjeita liittämisprosessiin liittyen, mutta niitä ei käydä tässä yhteydessä läpi (ENTSO-E 2012).

4.4.2 Verkkoyhtiö

Verkkoyhtiö haluaa, että laitteisto ei aiheuta verkon suuntaan ongelmia. Tätä varten tehdään koestus- ja käyttöönottopöytäkirjat, joiden perusteella lupa tuo-

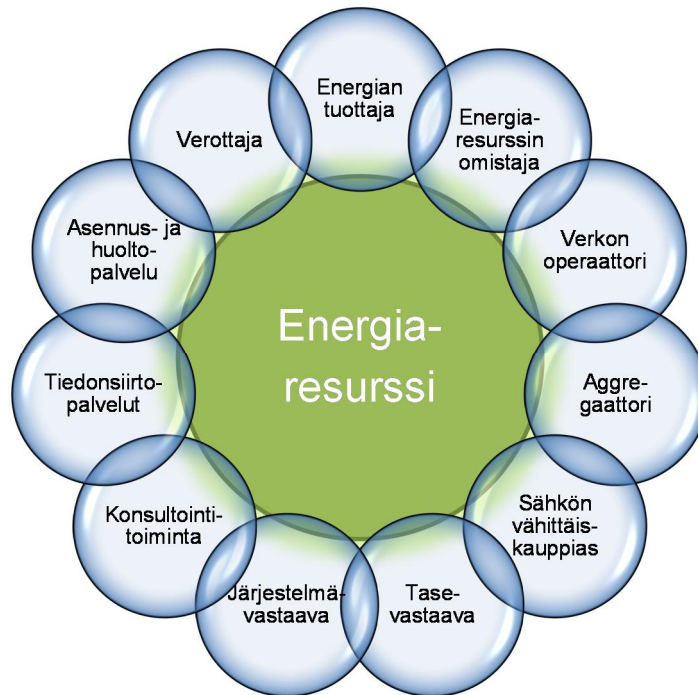
tannon aloittamiseksi voidaan myöntää. Hankitun tuotantolaitoksen koosta riippuen asiakkaan solmupisteen teho voi vaihdella välillä ”entinen kulutus” — ”tuotantosolmu”. Verkkoon syöttämiseksi asiakkaan on tehtävä verkkoyhtiön kanssa erillinen sopimus. Niin asiakkaan, verkkoyhtiön kuin muidenkin lueteltujen osapuolien toimintaa ohjaavat luonnollisesti erilaiset lait, määräykset, standardit ym. ohjeet. Tällä hetkellä yleisin tilanne on se, että pientuotantolaitoksen hankkimisen jälkeen toiminta on asiakkaan ja verkkoyhtiön ”kahden välinen kauppa”. Tällöin verkkoyhtiö tietää (toivottu tilanne) mitä on liitetty ja mihin on liitetty, asiakas tuottaa osan omasta sähköstään ja kenties syöttää sitä joskus verkkoonkin päin. Käyttöönottotarkastuksen jälkeen normaalista käytöstä poikkeavia toimia ei pitäisi olla, tai mikäli on, on niistä oltava yhteydessä verkkoyhtiöön. Tällöin on tarvittaessa tehtävä uusi käyttöönottotarkastus.

4.4.3 Sähkökauppias

Sähkön käyttäjällä eli asiakkaalla todennäköisesti on sähkösopimus jonkun sähkön myyjän kanssa, ellei käyttäjä myös ole 100% omavarainen sähkön tuottaja. Pientuotantolaitteiston hankkiminen näkyisi tässä tapauksessa pienentyneenä sähkönostotarpeena. Riippuen tuotantomuodosta, voi asiakkaan sijoittaminen jonkun ryhmän tyyppikuluttajaksi hankaloitua sähkön myyjän kannalta. Muutama poikkeus ei tosin vielä vaikuta merkittävästi, mutta jos tuotantolaitoksia alkaa olla enemmän, voi sähkön hankinnan arviointi vaikeutua. Tähän liittyy myös jo aiemmin mainittu kuormituskäyrien yksilöinti. Asiakkaan ryhtymistä sähkön myyjäksi ei käsitellä tässä yhteydessä, toiminnan ollessa nykytilanteessa lähes poikkeuksetta kannattamatonta. Pientuottajan ja sähkön myyntiyhtiön välinen osto-myynti-sopimus on myös mahdollinen (Lehto 2009).

4.4.4 Tulevaisuuden osapuolia

Ottamatta kantaa aikajänteeseen, voi toimijoihin lukeutua tulevaisuudessa mm. seuraavia tahoja ja palveluiden tuottajia (Valkonen et al. 2005):



Kuva 4.8. Energiaresurssiin tulevaisuudessa mahdollisesti liittyviä toimijoita.

Nykyisellään suurin osa luvun 4.4.1 eri toimijoista voidaan yhdistää energiaresurssiin, tässä tapauksessa tuotantolaitokseen, aivan sen alkumetreillä. Suurin muutos tulevaisuudessa liittyy siihen, kuinka monta toimijaa on yhdistettävissä energiaresurssiin sen elinkaaren aikana, jos energiaresurssi ajatellaan osaksi SG-ympäristöä. Osa toimijoista säilyy edelleen alkuvaiheen toimijoina, mutta käyttövaiheen toimijoita tulee lisää.

4.5 Haasteita

Tässä luvussa on käsitelty pientuotantolaitteiston verkkoon liittämiseksi vaadittavia asioita ja liittämisen haasteita. Mikäli asiakas hankkii tekniset vaatimukset täyttävän tuotantolaitoksen, voidaan se sähkömarkkinalain mukaisesti asiakkaan niin halutessa liittää jakeluverkkoon. Liittämisen keskeinen haaste Suomessa on, ettei ole olemassa ns. ”Plug&Play-menetelmää” tuotantolaitteiston vaatimustenmukaisuuden toteamiseksi ja liittämisen muiden vaikutusten analysoimiseksi. Tämän vuoksi jokainen uusi tuotannon liittäjä voi olla oma erikoistapauksensa verkkoyhtiölle. Ennen pitkää haasteita muodostuu niin verkkoon liittämisen,

vikatilanteiden kuin suunnittelunkin kannalta. Lisäksi toimintaympäristöön liittyvät taloudellisesti ja poliittisesti epävarma ilmapiiri niin sähkönkäyttäjän kuin verkkoyhtiönkin kannalta.

4.5.1 Sähköturvallisuus ja verkkotekniset asiat

Nykyisten verkkojen suojaus perustuu syöttävästä verkosta, eli ylemmältä jännitetasolta tuleviin vikavirtoihin. Säteilteisesti käytettävissä verkoissa suojaus on näin ollen suhteellisen yksinkertaista toteuttaa selektiivisesti. Yksittäiset tuotantolaitokset eivät välttämättä vielä häiritse suojauksen toimintaa, mutta yleistyessään perinteiseltä suunnittelufilosofialta häviää pohja, kun vikavirran suunta voi olla syöttävän verkon suuntaan. Tämä tekee suojauksen suunnittelusta erityisen haasteellista varsinkin PJ-verkoissa, koska niissä suojaavina komponentteina käytetään varokkeita. Ongelmia voi syntyä suojalaitteiden virheellisistä toiminnista tai toimimattomuudesta, joka aiheuttaa riskin niin sähköturvallisuuden kuin laiterikkojenkin kannalta. Yksi merkittävä kysymys on, tarvitseeko myös PJ-verkoissa käyttää relesuojausta ja voidaanko asiakaskohteessa sijaitsevaa automaatiota hyödyntää edes jossain määrin osana verkon suojausta? Tähän kysymykseen pyritään muodostamaan näkemys luvussa viisi.

Verkkoyhtiö vastaa jakeluverkon turvallisuudesta, mutta nyt sähkön käyttäjä pystyy omilla toimillaan ja laitteistoillaan aiheuttamaan uudenlaisia riskejä myös verkkoyhtiön ”tontille”. Omien laitteistojen vaikutukset voivat ylettyä myös jakelumuuntajan yläjännitepuolelle, jolloin ongelma ei ole pelkästään kyseisen PJ-lähdön asiakkaiden. Näissäkin tapauksissa sähkön tuottaja (=asiakas, sähkön käyttäjä) on vastuussa omien laitteidensa aiheuttamista ongelmista. Sähkötyöturvallisuuden kannalta tulisi olla varma tieto kytketyistä pientuotantolaitteistoista ja mahdollisista syöttösuunnista työkohteeseen takasyöttövaaran takia. Sähköturvallisuuden toteutumisen takaamiseksi on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota. Lisäksi riittävien suojausasetteluiden ja selektiivisyyden aikaansaamisen seurauksena voi tulla tarpeettomia irtoamisia. Kuudennen luvun yhtenä tavoitteena on selvittää onko pientuotantolaitteiston liittämiseksi riittävän selkeitä määräyksiä.

4.5.2 Verkon suunnittelu ja käyttö

Sähköverkkoihin joudutaan tekemään lähitulevaisuudessa mittavia investointeja käyttöiän lähestyessä loppuaan. Vanhojen verkkojen purkaminen ja uusien rakentaminen systemaattisesti entisten paikalle ei ole järkevää. Ottaen huomioon sähköverkossa käytettävien komponenttien pitoajan ja SG-ympäristön, tulee strategiseen suunnittelutyöhön mukaan uusia erityishaasteita ja tarkasteltavia näkökulmia. Turhien tai väärin investointien riski kasvaa. Myös yhteiskunnan asettamat vaatimukset sähkön toimitusvarmuudelle ja sähkön laadulle ovat entistä tiukemmat. Erityisesti kaapelointikysymys on nyt pinnalla. Painopiste KJ- ja PJ-verkon välillä tulee muuttumaan nykyisestä siten, että PJ-verkon suunnitteluun ja käyttöön on panostettava nykyistä enemmän. Mikäli sähkönkäyttäjien omavaraisuus ja microgrid-toiminnallisuus yleistyy, voi joissain kohteissa KJ-verkon merkitys jopa pienentyä. Ensin tulisi kuitenkin saada yhteisten näkemysten kautta pientuotantolaitteistojen liittäminen osaksi rutiininomaista suunnittelutyötä ja suunnittelutyökaluja ja pientuotantoa liitettyä verkkoon.

4.5.3 Taloudelliset ja poliittiset

Pientuotannon investointikustannuksien takaisinmaksuaikaa tarkastellessa investointi voi näyttää täysin kannattamattomalta. Lisäksi, pientuotannon aiheuttamat investointitarpeet verkolle ovat toinen kuluerä, eikä tukitoimiakaan voi nähdä lyhyellä aikavälillä kansantaloudellisesti kannattavina. Energiankäytön tehostamiseen panostaminen vie rahaa. Aihepiiri on hyvin monitahoinen ja sitä tarkemmin tarkastellessa alkaa löytyä myös positiivisia ajureita, mutta niitä ei näy välittömästi:

- Ympäristövaatimukset
 - tarve hyödyntää vaihtoehtoisia energiantuotantomuotoja
 - sitoumukset energiantehokkuustoimiin
- Verkon saneeraustarve
 - edessä joka tapauksessa
 - kannattaa hyödyntää
- Teknologian kehittyminen
 - madaltaa kustannuksia jatkuvasti
 - erityisesti aurinkokennot ja akut
- Sähkön omavaraisuus
 - toimitusvarmuus
 - hintakehitys
- Kannattamattomuus
 - vastavoimana aika, jonka myötä
 - teknologian kehittyminen
 - sosiaalinen ”arkipäiväistyminen”
 - SG-ympäristön kehittymisen myötä tulevat edut
 - ennen pitkää kannattamattomuus → kannattavuus

Poliittinen näkemys on on monissa maissa ollut, että pientuotantoa halutaan lisää. Tätä kehitystä on tuettu syöttötariffein, jolloin markkinat ja teknologia ovat kysynnän myötä kehittyneet. Kehityksen myötä myös laitteistohinnat ovat voimakkaasti pudonneet. Näin on päästy tilanteeseen, jossa tukitoimia on voitu vähentää ja tavoitteena on, että markkina toimii ilman tukitoimia. Poliittisen tahtotilan seurauksena säädökset verkkoonliittämiseksi ja energian myymiseksi on tehty helpoiksi ja joustaviksi. Ihmiset ovat investoineet pientuotantoon positiivisten kannusteiden kautta. Monissa maissa tullaan saavuttamaan lähivuosien aikana ns. Grid Parity-tilanne, jossa itse tuotettu sähkö on samanhintaista kuin ostosähkö (Wacker Polysilicon 2010).

5 Suojaus ja sähköturvallisuus

Tämä luku käsittelee PJ-verkkoihin liitettävän tuotannon aiheuttamia suojausteknisiä haasteita ja sähköturvallisuutta vikatilanteissa. Luvussa käydään läpi PJ-verkkojen rakenne ja niissä käytettävä suojaustekniikka sekä tarkastellaan laskennallisesti ja simulaatioin tuotannon vaikutusta suojauksen toimintaan. Suojausteknisten haasteiden tarkastelu ja vikatilanteisiin liittyvät sähköturvallisuusriskit muodostavat yhdessä 6. luvun kanssa työn keskeisimmän sisällön.

5.1 PJ-verkon rakenne

Suomessa sähkön valtakunnallisesta siirrosta vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid OYJ ja jakelu loppukäyttäjille tapahtuu pääsääntöisesti paikallisten jakeluverkonhaltijoiden KJ- ja PJ-verkoissa. Jakelujärjestelmän pääosat voidaan jakaa taulukon 5.1 mukaisesti.

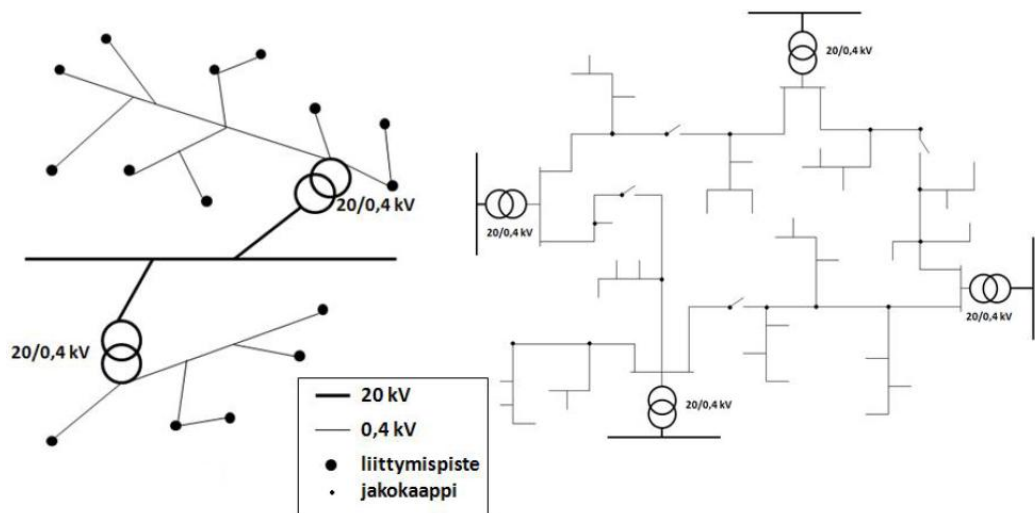
Taulukko 5.1. Suomen sähkönjakelujärjestelmän pääosat.

Verkon osa	Jännitetaso	Tyyppi
Alueverkot	110 kV, 45 kV	Ilmajohto
Sähköasemat	110/20, (45/20 kV)	Kenttä/Kevyt 110/20 kV
KJ-verkko	20 kV (10 kV)	Ilmajohto/Maa-/Vesistökaapeli
Jakelumuuntamot	20/0.4 kV (20/1 kV, 1/0.4 kV)	Pylväs-/Puisto-/Kiinteistömuuntamo
PJ-verkko	0.4 kV (1 kV)	Avo-/Riippujohto, Maa-/Vesistökaapeli

Fingrid OYJ:n omistamissa siirtoverkoissa ja jakeluverkkoyhtiöiden alueverkoissa (110 kV) sähkö siirretään sähköasemille. Jakeluverkonhaltijoiden KJ-verkoissa sähkö siirretään jakelumuuntamoiden kautta PJ-verkkoihin ja edelleen kuluttajille. PJ-verkot ovat sähkön käyttäjää lähinnä oleva osa siirto- ja jakeluketjua, alkaen asiakaspisteestä verkkoon päin mentäessä heti pääsulakkeista. Luvun sisältö keskittyy pelkästään PJ-verkkoihin.

Pienjänniteverkot ovat Suomessa haja-asutusalueella yleensä säteittäisiä ja taa-jama-alueella silmukoituja, joita syötetään säteittäisesti avoimena renkaana. Ha-

ja-asutusalueella syöttö on 20/0,4 kV muuntamolta ja kaupunkialueella yleisesti puisto- tai kiinteistömuuntamoiden (20/0,4 kV tai 10/0,4 kV) syöttämistä jakokaapeista. Jotkut verkkoyhtiöt ovat käyttäneet maaseudulla myös kilovolttia, jolloin päästään pidempiin johtopituuksiin. Kuvassa 5.1 on esitetty molemmista muuntopiireistä esimerkki.



Kuva 5.1. Tyypillinen PJ-verkon rakenne Suomessa. Vasemmalla on esimerkki maaseutumaisesta PJ-verkosta ja oikealla taajamaverkosta. (Löf 2011)

Taajamaverkossa mahdollisia syöttösuuntia on useampia, jolloin vikatilanteessa korvaavan syöttösuunnan käyttö ja keskeytysajan lyhentäminen ainakin osalle asiakkaista onnistuu. Suomessa PJ-verkko on riittävän vikavirtatason ja kosketusjännitesuojauksen toteutumiseksi käyttömaadoitettu (TN-C), asiakaspisteessä asiakkaan PEN-kiskoon ja muuntamalla vastaavasti muuntajan tähtipisteen kanssa maihin. Taajamissa lähtöjen tehot liikkuvat sadoissa kilowateissa, maaseudulla pienimmissä kohteissa jopa alle kilowatissa. Taajama-alueilla käytetään maakaapelia sähköturvallisuuden, ulkonäköseikkojen ja käyttövarmuuden takia. Taajama-alueen viat koskettavat huomattavasti suurempaa asiakasjoukkoa, kuin maaseudulla, missä saman haaran asiakkaita on yleensä vain muutamia. Maaseudulla yleisin rakenne on puupylväät ja AMKA-riippukierrekaapeli, mutta kaapelointikustannusten lähestyessä erityisesti suotuisissa kohteissa (auraus) ilmajohtojen kustannuksia, on PJ-verkkojen kaapelointi yleistynyt. Käytännössä nykyään

lähes kaikki PJ-verkot tehdään maakaapeloituna (Löf 2011). PJ-verkossa tapahtuvat häviöt (ml. muuntajahäviöt) käsittävät 80% jakeluverkossa tapahtuvista häviöistä (Löf 2011). (Lakervi & Partanen 2008)

Muuntamot ovat maaseudulla yleensä pylväsmuuntamoita, joissa muuntaja on kiinnitetty puupylväisiin, ja tavallisesti käytetään ylijännitesuojana kipinäväliä. Koot vaihtelevat 16-315 kVA:n välillä. Taajamissa muuntajat ovat isompia ja paremmin suojattuja. Tyypillinen esimerkki on puistomuuntamo, jossa KJ-kaapeli syöttää KJ-kiskostoa ja PJ-lähtöjä. KJ-kojeistot voivat olla myös SF6-kaasueristeisiä, jolloin päästään pienempään tilankäyttöön. Tehot ovat yleensä MVA:n luokkaa. (Lakervi & Partanen 2008)

5.1.1 Suojaukselta vaadittavat ominaisuudet

PJ-verkkojen suojauksen tavoitteena on estää verkkokomponenttien vahingoittuminen vikatilanteissa ja estää hengenvaarallisten kosketusjännitteiden muodostuminen. Yleisiä suojaukselta vaadittavia ominaisuuksia (ns. suojauksen filosofia) ovat:

- Aukottomuus
 - jokainen piste verkossa kuuluu jonkun suojalaitteen alueelle
- Selektiivisyys
 - vikaa lähinnä oleva suojalaite toimii ja jos ei, niin edellinen toimii
- Luotettavuus
 - yksinkertainen ja varmatoiminen
- Nopeus
 - suojalaite on riittävän nopea
- Koestettavuus
 - toiminta on tarvittaessa varmistettavissa
- Edullisuus
 - teknis-taloudellinen optimi

Suojauksen toimivuuden kannalta oikein mitoitettu sulakesuojaus (ylik./oikos.) ja riittävän pieniresistanssiset maadoitukset ovat tärkeimmät seikat. Sulakkeen on kestävä kuormitusvirta, mutta toimittava riittävän nopeasti myös suojauksen kannalta hankalimmassa tilanteessa, eli 1-vaiheisessa oikosulussa johdon loppupäässä, jolloin vikavirta on pienimmillään (I-nollausehto). Syötön nopea

poiskytkentä on tapahduttava 5 sekunnissa tai verkkoyhtiön harkinnan mukaan korkeintaan 15 sekunnissa eikä nollajohtimen jännite saa nousta yli 75 V:n määsään verkonosassa. Muutoin voi olla tarpeen käyttää lisäpotentiaalintasausta tai paksumpaa PEN:ä. (Lakervi & Partanen 2008)

Kosketusjännitesuojauksen toteutumiseksi SFS 6000:n mukaan pienin oikosulkuvirta on oltava gG-sulakkeella taulukossa 5.2 esitetyn mukainen.

Taulukko 5.2. Kosketusjännitesuojausvaatimuksen toteutumiseksi vaadittava sulake pienimmän yksivaiheisen oikosulkuvirran mukaan. (Lakervi & Partanen 2008)

Sulake	Pienin 1-v oikosulkuvirta
gG, $I_N < 63$ A	$2,5 \times I_N$
gG, $I_N > 63$ A	$3,0 \times I_N$

Sulaketyyppi gG tarkoittaa varoketta, joka suojaa sekä ylivirralla että oikosululta. Nykyisin suunnitteluena pidetään monissa verkkoyhtiöissä SFS-6008-8-801:ssä mainittua 250 A:a, jolloin verkon jännitejäykkyys on yleensä myös riittävä (Lakervi & Partanen 2008). Kuitenkin, verkoissa on myös kohteita, joissa 250 A ei toteudu. Uuden tekniikan liittäminen vanhojen suojausperiaatteiden mukaan tehtyihin verkkoihin asettaa haasteensa. Seuraavassa aliluvussa käydään läpi tarkemmin suojaustekniikkaa, jolla tämän luvun vaatimukset toteutetaan.

5.1.2 Suojaustekniikka

PJ-verkkojen suojaus perustuu varokkeilla (gG-sulake) toteutettavaan ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukseen yhdessä riittävien maadoitusten kanssa. Sulakesuojaukseen on päädytty, koska releiden käyttö PJ-verkoissa tulisi kalliiksi ja mahdollinen sulakepalo ei kosketa kovin suurta asiakasjoukkoa toisin kuin vika KJ-verkossa. PJ-verkoissa ylikuormitussuojausta ei vaadita käytettäessä kaapeleita, eikä paljailta tai itsestään sammuvilta johtimilta. AMKA-johdot on suojattava myös ylikuormitukselta. Pääasiassa varokkeet sijoitetaan muuntamolle, kunkin lähdön kullekin vaihejohtimelle. Välisulakkeiden käyttöä avojohtoverkossa pyritään välttämään, mutta niiden käyttö voi olla tarpeen pidemmällä joh-

tohaaroilla. AMKA:n tapauksessa voidaan ylikuormitussuojana käyttää myös liittymän pääsulakkeita. Maakaapeliverkossa käytetään runkojohdon suojauksen lisäksi jakokaapeilla välisulakkeita. Tällöin sulakesuunnittelussa tulee lisäksi huomioida mahdolliset varasyöttösuunnat. Muuntopiirin jakorajana voi toimia jakokaappi, jossa muuntopiirit yhdistävä varoke on normaalitilanteessa sulakkeeton. (Lakervi & Partanen 2008)

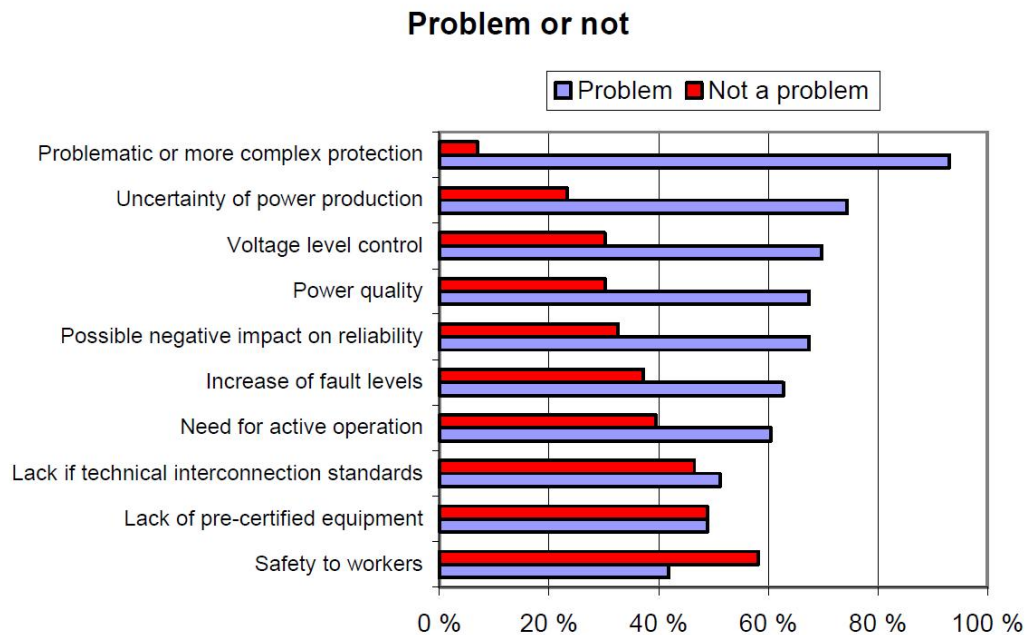
Maadoitusten tehtävänä on estää liian suuret kosketusjännitteet ja taata riittävän suuri vikavirtataso. Esimerkiksi KJ-verkon maasulussa PJ-verkon maadoitusten tehtävänä on nostaa liittymän maapotentiaali maadoitusjännitettä vastaavalle tasolle, jolloin asiakaskohteen laitteiden kuoren ja maan välille ei pääse syntymään hengenvaarallista potentiaaliero. Maadoitus on tehtävä lähdon alussa eli muuntamalla ja lisäksi yli 200 m:n lähdoilla loppupäässä, tai korkeintaan 200 m päässä siitä (II-nollausehto). Lisäksi suositellaan pidemmille lähdoille 500 m:n välein lisämaadoituksia. Maadoitusimpedanssin tulee olla alle 100 Ω , tai maadoitus on tehtävä kullekin haaralle erikseen. (Lakervi & Partanen 2008)

AMR-mittareiden myötä PJ-verkkoon tulee yksi suojalaite lisää. Varsinaista aktiivista suojausfunktioita sillä ei ole, mutta mittarin avulla pystytään havaitsemaan johdinkatkeamat ja vaaralliset nollaviat, jotka aiemmin ilmenivät ”erikoisina ilmiöinä”, kuten normaalista poikkeavina jännitetasoina ja valojen vilkkumisena. Tällöin pahimmassa tapauksessa kulutuslaitteen suojamaadoitetut osat (esim. metallikuori) voivat olla jännitteellisiä. AMR-mittarin tehokasta käyttöä aktiivisena suojalaitteena haittaa kuitenkin nykyään tiedonsiirron hitaus. Esimerkiksi nollavika havaitaan, mutta AMR-mittari ei yleensä automaattisesti erota käyttöpaikkaa vaan viasta menee tieto valvomoon. Suomessa on myös kohteita, jossa ylipäättään yhteyden saaminen AMR-laitteisiin aiheuttaa haasteita. Kuitenkin, tilanteissa, joissa aikakriittisyys ei ole millisekunti- tai edes välttämättä sekuntitasolla, voidaan AMR-mittaria hyödyntää. Esimerkiksi tuotantoyksiköllisen käyttöpaikan voisi erottaa kokonaan verkosta AMR-mittarin avulla verkon korjaustöiden ajaksi.

5.2 Pientuotannon vaikutus suojauksen toimintaan

Suojauksen suunnittelu on perustunut tähän asti johdon termisen kestoisuuden ja ylikuormitussuojauksen sekä kosketusjännitesuojauksen näkökulmasta riittävän nopean poiskytkennän varmistamiseen ja näiden avulla oikean sulakevalinnan tekemiseen. Tilanne on tarkastettu uudestaan, mikäli verkossa on tapahtunut joi-takin suojaukseen vaikuttavia tekijöitä kuten topologia- tai poikki-pintamuutok-sia. Tehty tarkastelu ja suunnittelu on pätenyt kyseiseen kohteeseen, kun se on kerran tehty. Pientuotantoa liitettäessä suojauksen suunnittelusta tulee hankalaa, koska tuotantolaitteisto pääsee vaikuttamaan sekä normaaliin kuormitustilantee-seen että vikatilanteisiin. Se pienentää kuormitusvirtaa tuottaessaan, mutta ei välttämättä aina ole tuotannossa. Se kasvattaa vikavirtatasoa todellisessa vika-paikassa, mutta voi pienentää sulakkeen näkemää vikavirtaa. Jo nykyisellään on kohteita, joissa riittävän vikavirtatason saavuttaminen on hankalaa sulakesuoja-uksen näkökulmasta. Tällöin jo ensimmäinen liitettävä tuotantolaitos voi aiheut-taa ongelmia.

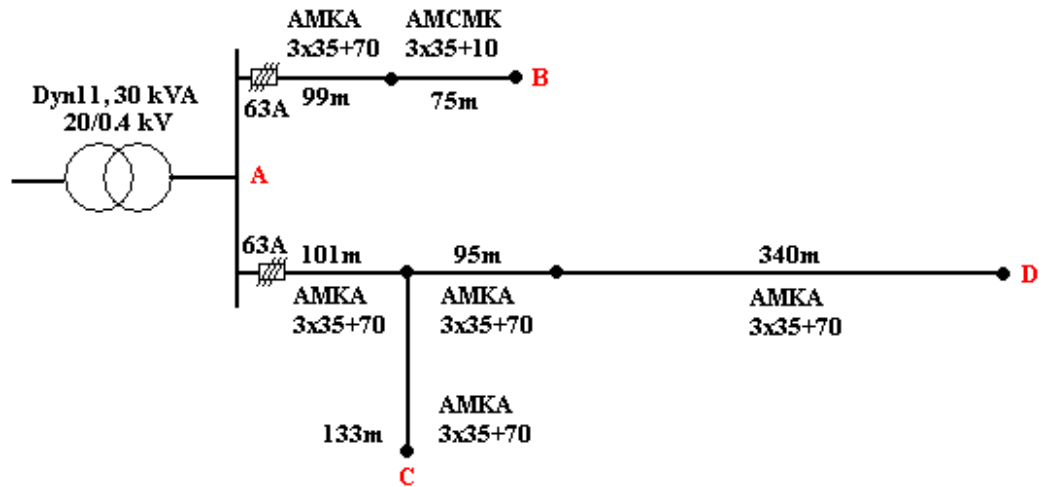
Seuraavien tarkastelujen tarkoituksena on selvittää, miten liittyvät pientuotanto-laitokset tulisi huomioida suojaussuunnittelussa. Nykyisilläkin menetelmillä voi-daan suunnitella suojausteknisesti toimiva verkko, mutta ennen pitkää päädytään tilanteeseen, jossa suojausalueita tulee useita ja suojauksen toimivuus on ikään kuin ”viritetty äärimmilleen”. Tästä voi seurata monimutkaistuva ja sirpaleinen verkko suojausalueiden kannalta, turhia sulakepaloja, keskeytyksiä ja selektiivisyyso ongelmia. Lisäksi tämänkaltainen toimintatapa ei luo pohjaa tulevaisuutta varten. Kuvassa 5.2 on esitetty CODGUnet tutkimusraportissa neljästä pohjois-maasta saatuja näkemyksiä hajautetun tuotannon haasteista.



Kuva 5.2. Hajautettuun tuotantoon liittyvät merkittävimmät haasteet ja niiden ongelmallisuus. (Jäntti 2003)

Kuvan tuloksista nähdään, että suojaukseen liittyvät haasteet ovat nousseet merkittävämmäksi ongelmaksi. Lisäksi on mainittu, että suomalaiset, ruotsalaiset ja norjalaiset verkkoyhtiöt arvelivat DG:n aiheuttavan kompleksisuutta verkon hallintaan ja käyttöön. Tanskalaisten vastaukset tutkimuksessa toteutettuun kyselyyn olivat myös vahvistaneet tämän. (Jäntti 2003)

Tarkasteluja varten laadittiin MATLAB®:n Simulink®-ympäristössä simulointimalli PJ-verkosta, jonka avulla pystyttiin havainnollistamaan ainakin osaa seuraavissa aliluvuissa esitetyistä suojausongelmista. Simulointiympäristön valintaa pohdittiin alussa muutamien ohjelmistojen välillä ja lopulta päädyttiin MATLAB®:iin ja Simulink®:iin. Kyseinen ohjelmisto ei välttämättä ollut vaihtoehtoista paras suoranaisesti sähköverkkojen simulointiin, mutta siihen päädyttiin lopulta muiden syiden takia. Lähdetessä rakentamaan simulointimallia tyhjästä, oli tarpeen selvittää, saako sen avulla vertailukelpoisia tuloksia. Vertailukohdaksi otettiin LUT:n sähkömarkkinalaboratoriossa oleva, todellisen verkkoyhtiön verkkoon perustuva demoverkko ja sen eräs muuntopiiri. Työssä käytetyn verkon yksinkertaistettu verkkokuva on esitetty kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Simuloinneissa käytetyn PJ-verkon yksinkertaistettu verkkokuva.

Simulointimallissa oli monenlaisia haasteita huolimatta sen yksinkertaisuudesta. Muun muassa jakelumuuntajan ja syöttävän verkon parametrisointi aiheutti ongelmia. Verkkotietojärjestelmästä (VTJ) saatuja tuloksia (Liite V) verrattiin simuloituihin tuloksiin ja lisäksi ne laskettiin vielä käsin, josta esimerkki liitteessä VI. Lopulta simulointimallista saatiin riittävällä tarkkuudella vastaavia tuloksia kuin VTJ:stä ja laskennallisesti. Työssä havaittiin, että VTJ:n parametrien oikeellisuus on syytä varmistaa, ennen kuin tarkastelua suorittaa pidemmälle. Yllä olevan verkon simulointimallista, VTJ:stä ja laskennallisesti saadut pienimmät yksivaiheiset oikosulkuvirrat PJ-verkon eri pisteissä on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3. Simulointimallin tuottamat, VTJ:stä saadut ja laskennalliset pienimmät yksivaiheiset oikosulkuvirrat PJ-verkon eri pisteissä ilman pientuotantoa.

Vika- paikka	Laskennallinen [A]	Simuloitu [A]	VTJ [A]	Ero [%]	
				Simu/Lask.	Simu/VTJ
A	1036	981	987	-5,3	-0,6
B	397	397	394	0,0	0,8
C	392	388	390	-1,0	-0,5
D	211	212	213	0,5	-0,5

Kuten tuloksista nähdään, ne täsmäävät varsin hyvin. Tulokset myös vahvistavat, että simulointimalli toimii. Ainoastaan laskennallinen ja simuloitu kiskovika eroavat noin 5%. VTJ:n kanssa simulointi kuitenkin täsmää, joten poikkeama laskennallisessa tuloksessa johtuu todennäköisesti muuntajan mallinnuksesta. VTJ:n tarkasta laskentamenetelmästä ei ole selvyyttä, mutta niiltä osin, kuin se vain oli mahdollista saada asetusten avulla vastaamaan ideaalitulannetta, se tehtiin, jotta päästiin mahdollisimman lähelle vastaavaa tilannetta kuin simuloinnissa ja laskennallisesti. On hyvin tapauskohtaista, riippuen mm. johtopituudesta, vikapaikasta ja tuotantolaitoksen sijoittumisesta verkkoon, miten paljon tuotantolaitosteho vaikuttaa alentavasti lähdön alussa sulakkeen näkemään vikavirtaan. Sulakkeen näkemä vikavirta on herkkä muiden parametrien muutoksille, joten todellisessa tapauksessa parametrien oikeellisuuden varmistaminen on erittäin tärkeää ja ”varmuusvaraa” on syytä jättää.

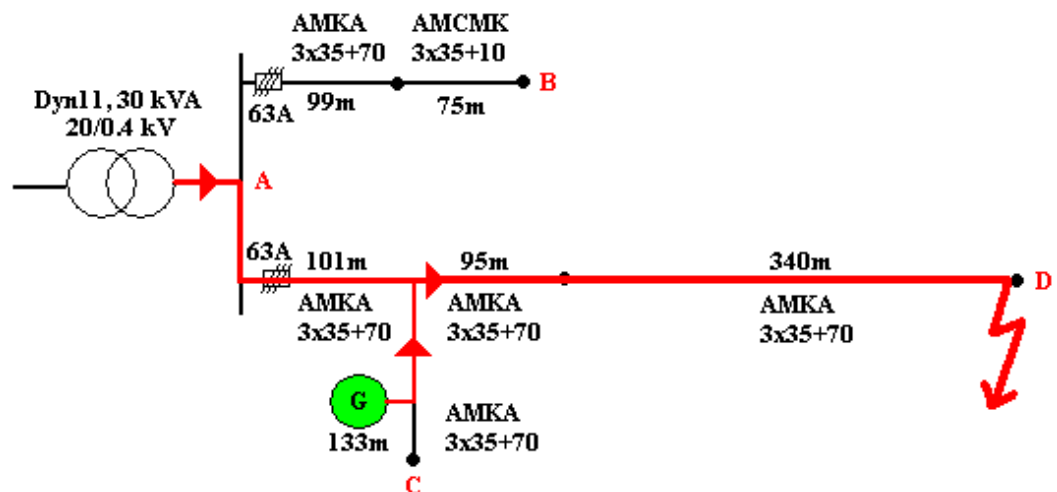
Simulointimallin tulokset vastasivat laskennallisia tuloksia riittävän hyvin, jotta mallin voitiin olettaa toimivan ja verkkoon voitiin tehdä muutoksia, joiden vaikutuksia pystyttiin havainnoimaan helpommin ja nopeammin eri puolella verkkoa. Malli tarjoaa nykyisessä muodossaan lähinnä pohjan jatkokehitykselle. Työn aikana osoittautui, että mallin kehittämisessä tulee välillä eteen aikaa vieviä haasteita, joiden takia sitä ei pystytty työssä viemään pidemmälle. Sillä saatiin kuitenkin mallinnettua esimerkkiverkko ja tärkeimmät vikatilanteet, sen toimivuus ja käyttöpotentiaali Simulink®-ympäristössä pystyttiin osoittamaan, se riitti diplomityössä käsiteltävien ilmiöiden tarkastelemiseen ja sen kehittämistä on tarkoitus jatkaa. Nykyisellään malli on melko staattinen ja vaatii tulkitsemista mitä reaalisessa verkossa tapahtuisi. Tärkeimpiä jatkokehitystarpeita ovat erityisesti johtojen $\frac{\Delta R}{\Delta T}$ -riippuvuuden huomioon ottaminen, sulakkeen sulamisen mal-

linnus, syöttävän KJ-verkon tai ainakin osan siitä luominen, verkkovaihtosuuntaajan mallinnus (virtalähde, suodin, LoM-suoja), todellisen vikaresistanssin parempi arviointi ja muuntajan tarkempi parametrisointi. Vaikka työssä muodostettu simulointimalli onkin tällä hetkellä lähinnä tietyn verkon osan ”oikosulkusimulaattori”, on sen muuttaminen vastaamaan toisenlaista verkkoa suhteelli-

sen yksinkertaista. Seuraavat aliluvut käsittelevät tyypillisimpiä esimerkkitapauksia pientuotantolaitteiston aiheuttamista suojausongelmista.

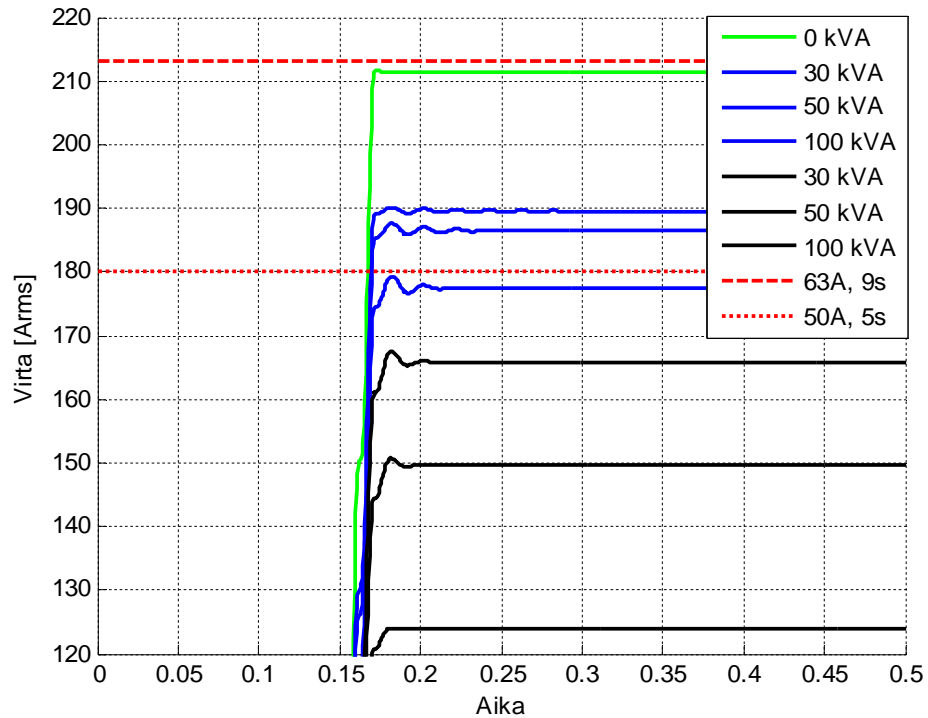
5.2.1 Suojauksen sokaistuminen

Suojauksen sokaistumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa verkkoon liitetty tuotantolaitos osallistuu vikavirran syöttöön ”sivusta” siten, että se pienentää sulakkeen näkemää vikavirtaa. Tilanne on sitä herkempi syntymään, mitä syvemmällä verkossa ollaan (eli mitä pienempi 1v-oikosulkuvirta) ja mitä suurempi on tuotantolaitoksen kyky syöttää vikavirtaa. Oletetaan mahdollisiksi tuotantolaitoksen paikoiksi kulutuspaikat. Asiakkaalla on siis tuotantoa omassa käyttöpaikassaan. Otollisia ongelmakohtia ovat ne kombinaatiot, joissa tuotantolaitos ja vika ovat hyvin lähekkäin ja lisäksi ne kohteet, joissa tuotantolaitos pääsee syöttämään runkojohtoa sivusta. Tässä tapauksessa verkossa on jo yksi piste, jossa vikavirta jää alle 250 A ja sulakkeen palamiskäyrän (Liite IV) perusteella palamisaika on noin 9 s. Tällaisissa kohteissa pientuotannon lisääminen on hankalinta. Mikäli kuormitusvirta antaa myötä, voisi sulakekokoja pienentämällä saada poiskytkennän tapahtumaan riittävän nopeasti, mutta tilanne on tarkasteltava aina tapauskohtaisesti.



Kuva 5.4 Suojauksen sokaistuminen. Tuotantolaitos (G) syöttää vikavirtaa sivusta ja pienentää lähden alussa olevan sulakkeen läpi menevää vikavirtaa.

Kuvan 5.4 mukaisesta esimerkistä on esitetty simulointitulokset alla olevassa kuvassa 5.5. Simulointi on tehty VVS:lla liittyvälle ja epätahtigeneraattorituo-
tannolle erikseen.



Kuva 5.5 Suojauksen sokaistuminen. Pisteessä D tapahtuu yksivaiheinen oikosulku hetkellä 0.15 s. Kuvassa on lähdön alussa olevan sulakkeen näkemät vikavirrat eri tapauksissa. Vihreä on referenssitaso, eli vikavirta ilman tuotantoa. Sinisellä on VVS:llä liittyvä tuotanto ja mustalla epätahtigeneraattorituo-
tanto. Sulakkeen näkemät vikavirrat pienentyvät tuotantolaitostehon kasvaessa.

Kuvasta nähdään, että mikäli lähdön sulaketta on mahdollista pienentää 50 A:iin, voidaan VVS-liitännäistä tuotantolaitostehoa liittää yli 50 kVA, vaikka tilanne on jo lähtökohtaisesti hankala. Tällöin tosin ero suositeltuun 250 A:iin kasvaa entisestään. Epätahtigeneraattorituo-
tantoa ei voi varmuudella liittää ainakaan yli 10 kVA:a, vaikka sulaketta pienentäisikin 50 A:iin. Taulukossa 5.4 on esitetty kuvan 5.5 mukaisen tilanteen laskennalliset vikavirrat.

Taulukko 5.4. Simuloidut ja laskennalliset sulakkeen näkemät vikavirrat eri tuotantolaitostehoilla, kun vika tapahtuu pisteessä D ja tuotantolaitos on pisteessä C. Vikavirrat on tarkasteltu VVS:n ($i_{\text{suhte}}=1.2$) ja epätahtigeneraattorin ($i_{\text{suhte}}=7$) tapauksille.

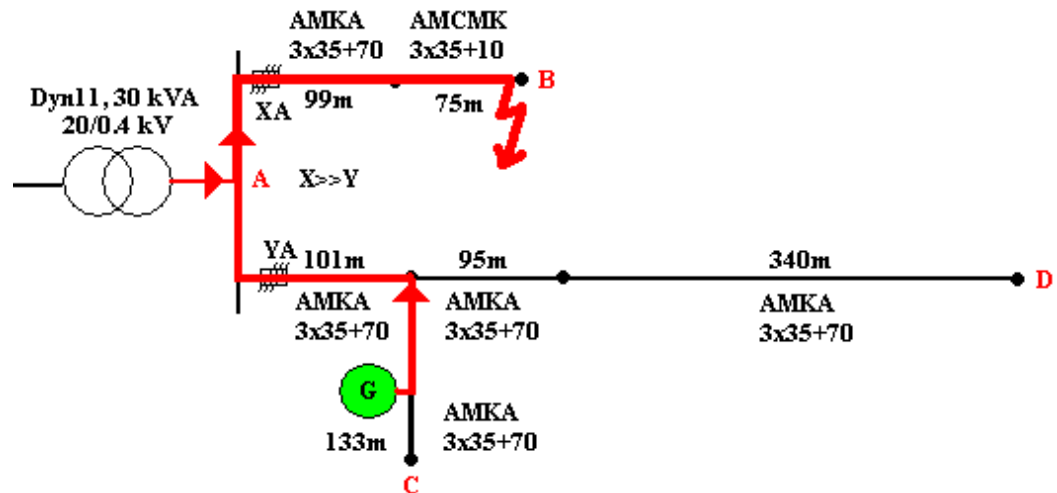
Tuotantolaitoksen teho [kVA]	Laskennallinen vikavirta [A]		Simuloitu vikavirta [A]	
	VVS	Epät.	VVS	Epät.
0	211	211	212	212
30	188	167	190	166
50	184	149	186	150
100	175	122	177	124

Simuloinnin ja laskennan tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Jos verrataan esimerkiksi 30 kVA:n ja 50 kVA:n tuloksia, havaitaan, että 20 kVA:n tuotantolaitostehon muutos näkyy vain 4 A sulakkeen näkemässä vikavirrassa. Mitä lähempänä liitettävän tuotantolaitoksen teho on kohteen (sulakkeen) sallimaa liitettävää maksimitheoa, sitä tärkeämmäksi korostuu parametrien oikeellisuus.

Kuten nähtiin, ainakin VVS:llä liittyvää tuotantoa on mahdollista liittää C-pisteeseen. Vaikkakin esimerkin tilanne on jo lähtökohtaisesti hankala, niin ensinnäkin tuotantolaitos sijaitsee suhteellisen pitkän haaran päässä ja toisekseen tuotantolaitoksen impedanssi on moninkertainen jakelumuuntajan ja syöttävän verkon impedanssiin verrattuna. Esimerkkitapaus on hyvä, koska yli 5 s sulamis-aikoja löytyy varmasti PJ-verkoista ja erityisesti niissä tapauksissa on pientuotannon vaikutus otettava huomioon, myös silloin, kun tuotantoa liitetään johonkin muuhun asiakaspisteeseen. Muissa verkon pisteissä vikavirtataso on hyvä, ja verkko on muutenkin vahva suhteessa muuntopiirin huipputehoon. Koska VVS ja sen suojausfunktiot puuttuvat simulointimallista, on jatkotarkastelulle tarvetta. Erityisesti LoM- ja alijännitesuojauksen toiminnan riippuvuutta vikapaikan sijainnista ja tuotantolaitoksen tehosta olisi hyvä tarkastella, jos verkosta löytyy sellaisia paikkoja, joissa tapahtuvia vikoja VVS:n suojaus ei havaitse. Esimerkiksi tässä tapauksessa, kuinka pitkälle vika voisi ”siirtyä” runkojohtoa pitkin kohti pistettä D, että pisteessä C olevan VVS:n suojaus vielä toimii ja sulakesuojaukselle tuotanto ei näy käytännössä juuri mitenkään.

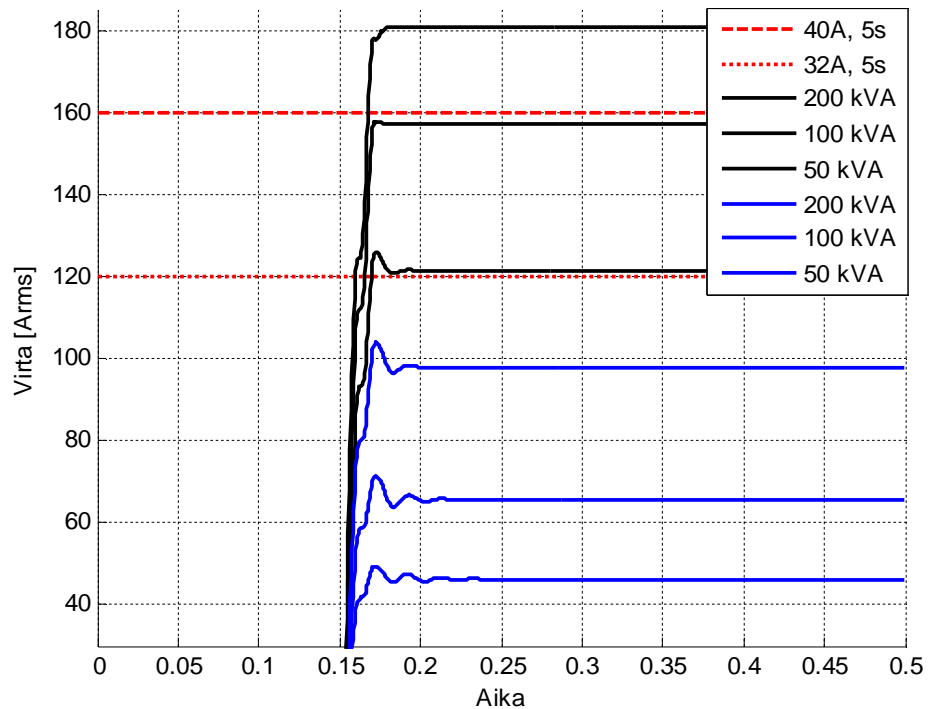
5.2.2 Viereisellä lähdöllä tapahtuva vika

Oletetaan esimerkiverkossa vika pisteeseen B ja tuotantolaitos pisteeseen C. Tässä tapauksessa molempia lähtöjä suojaavat sulakkeet ovat samankokoiset. Tuotantolaitoksen syöttäessä vikavirtaa on pisteen B sisältävän lähdön sulakkeen näkemä vikavirta suurempi, joten ongelmaa ei synny. Jos vikaantuvan lähdön sulake olisikin suurempi kuin tuotantolaitoksen sisältävän lähdön sulake, on mahdollista, että riittävän suuri tuotantolaitos polttaisi vikavirtaa syöttäessään oman lähdön sulakkeen ennen vikaantuneen lähdön sulaketta. Tästä aiheutuisi turha keskeytys väärälle lähdölle. Tilanne on sitä todennäköisempi, mitä enemmän vikavirtaa tuotantolaitos pystyy syöttämään, mitä lähempänä se on jakelumuuntajaa ja mitä pienempi on tuotantoa sisältävän lähdön sulake verrattuna vikaantuvan lähdön sulakkeeseen. Kuva 5.6 havainnollistaa tilannetta.



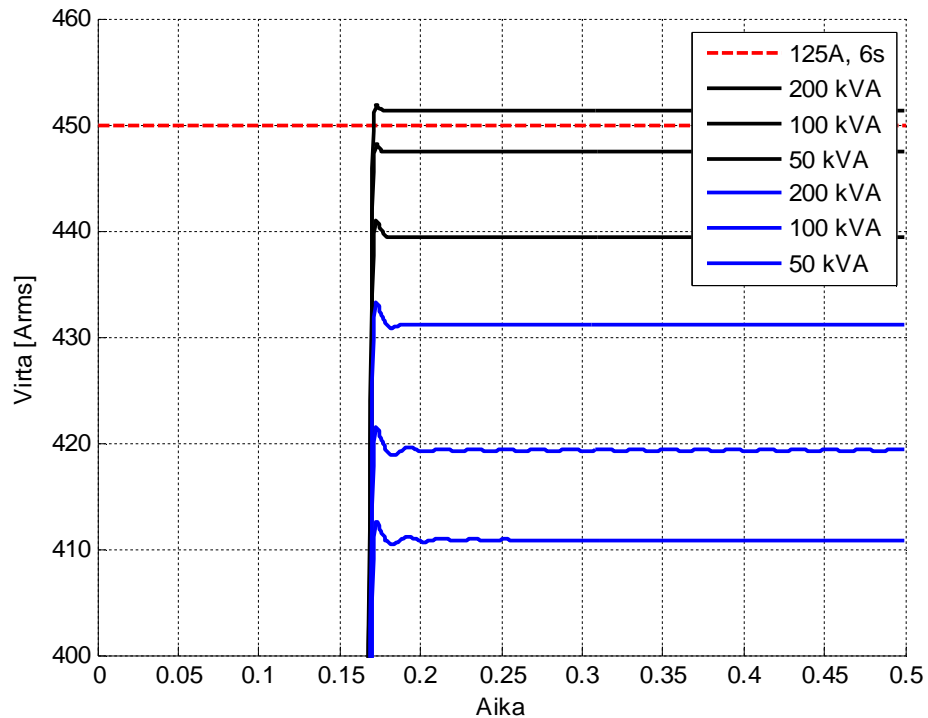
Kuva 5.6 Viereisellä lähdöllä tapahtuva vika. Tuotantolaitos (G) syöttää suurta osaa vikavirrasta suhteessa muuntajaan, jolloin vikavirta polttaa ensin generaattorilähdön pienemmän sulakkeen.

Yllä olevan kuvan mukaisen tilanteen alemman lähdön alussa olevan sulakkeen näkemät yksivaiheiset vikavirrat on esitetty eri tuotantolaitostehojen tapauksissa kuvassa 5.7.



Kuva 5.7 Viereisellä lähdöllä tapahtuva vika. Pisteessä B tapahtuu vika hetkellä 0,15 s. Kuvassa on pisteeseen C liitetyn tuotantolaitoksen syöttämät, alemman lähdön alussa olevan sulakkeen näkemät yksivaiheiset vikavirrat. Mustalla viivalla esitetty on epätahtigeneraattorin tapaus ja sinisellä VVS. Kuvaan on lisäksi piirretty kahden eri sulakkeen 5 sekunnin paloaikoihin tarvittavat virrat.

Kuvaan on piirretty kaksi sulaketta, joiden 5 s poiskytkentäaikaan vaadittava virta on lähellä esimerkkitapauksen alemman lähdön vikavirtoja. Tuotantolaitos on tässä tapauksessa suhteellisen kaukana jakelumuuntajasta, jonka vuoksi sen syöttämä vikavirta ei nouse kuvassa olevia suuremmiksi. Jos tuotantolaitos olisi lähempänä jakelumuuntajaa, olisi sen syöttämä vikavirta ja siten todennäköisyys tilanteen syntymiseksi myös suurempi. Alla olevassa kuvassa on esitetty ylemmän lähdön sulakkeen näkemä vikavirta vastaavissa tapauksissa.



Kuva 5.8 Viereisellä lähdöllä tapahtuva vika. Pisteessä B tapahtuu vika hetkellä 0,15 s. Kuvassa on jakelumuuntajan ja pisteeseen C liitetyn tuotantolaitoksen syöttämät, ylemmän lähdön alussa olevan sulakkeen näkemät yksivaiheiset vikavirrat. Mustalla viivalla esitetty epätahtigeneraattorin tapaus ja sinisellä VVS. Kuvaan on lisäksi piirretty esimerkki yhdestä sulakkeesta, jonka paloaika ylittäisi 5 s.

Alla olevaan taulukkoon 5.5 on koottu yllä olevien tapausten vikavirrat tuotantolaitostehon ja liittymistavan mukaisesti.

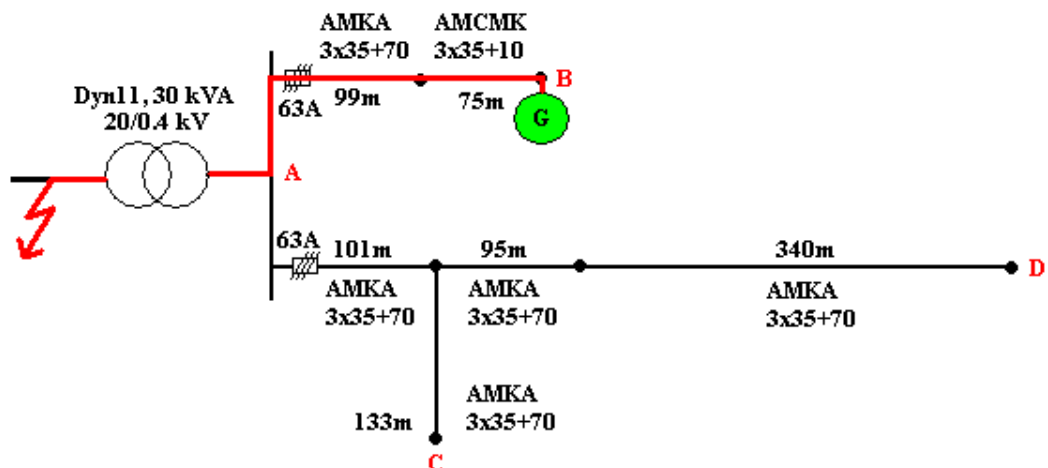
Taulukko 5.5. Simuloidut ja laskennalliset, alemman ja ylemmän lähdön sulakkeiden näkemät vikavirrat eri tuotantolaitostehoilla, kun vika tapahtuu pisteessä B ja tuotantolaitos on pisteessä C. Vikavirrat on tarkasteltu VVS:n ($i_{\text{suhde}}=1.2$) ja epätahtigeneraattorin ($i_{\text{suhde}}=7$) tapauksille.

Tuotantolaitoksen teho [kVA]	Alempi lähtö				Ylempi lähtö			
	Laskennallinen vikavirta [A]		Simuloitu vikavirta [A]		Laskennallinen vikavirta [A]		Simuloitu vikavirta [A]	
	VVS	Epät.	VVS	Epät.	VVS	Epät.	VVS	Epät.
50	43	114	46	121	413	439	411	439
100	63	150	66	157	421	447	419	447
200	94	172	98	180	433	454	431	451

Alemman lähdön laskennallinen ja simuloitu vikavirta eivät aivan täsmää. Siitä huolimatta voidaan havaita, että tilanteen syntymiseksi vaadittaisiin jakelumuuntajan kokoon nähden huomattava määrä epätahtigeneraattorituotantoa ja hyvin erikokoiset sulakkeet lähtöjen kesken. Esimerkiksi kombinaatiolla alemman lähdön sulake 32 A, ylemmän lähdön sulake 125 A ja 100 kVA:n epätahtigeneraattori voisi tilanne syntyä todennäköisimmin, jos muut asiaan liittyvät reunaehdot jätetään huomioita. Myös 50 kVA:n tuotanto voisi periaatteessa aiheuttaa väärän lähdön sulakkeen palamisen esimerkkitilanteessa. Jos ylemmän lähdön sulake olisi 100 A, niin 350 A riittäisi 5 s poiskytkentäaikaan. Ottaen huomioon muuntopiirin tehon, jakelumuuntajan koon, tuotantolaitoksen tehon, ja sulakkeiden koon on tilanne ainakin tässä tapauksessa lähinnä teoreettinen.

5.2.3 Vianaikainen syöttö

Vianaikainen syöttö liittyy KJ-verkossa tapahtuvaan vikaan, jossa jälleenkytkennän tarkoituksena on sammuttaa valokaari jännitteettömän ajan aikana. Tuotantolaitos voi kuitenkin ylläpitää verkon jännitettä. Näin ollen jännitteetöntä aikaa ei synny ja vian pysymisen lisäksi seurauksena on hyvin todennäköisesti epätahdissa tapahtuva kytkeminen. Lisäksi asiakkaille muodostuu epäonnistuneen PJK:n seurauksena pidempi jännitteetön aika ja samoin verkkoyhtiölle keskeytyskustannuksia. Alla on havainnollistus tilanteesta esimerkiverkossa.



Kuva 5.9 Vianaikainen syöttö. Tuotantolaitos (G) ylläpitää vikapaikan jännitettä, jolloin jälleenkytkentä epäonnistuu.

Tilanne syntyy sitä todennäköisemmin, mitä lähempänä jakelumuuntajaa vika sattuu KJ-verkon puolella ja mitä lähempänä jakelumuuntajaa ja mitä suurempi on tuotantolaitos PJ-verkossa. Ilmiön syntymistä rajoittaa vian seurauksena tapahtuvat muutokset verkon jännitteessä ja taajuudessa.

5.2.4 Turha irtoaminen

Turhalla irtoamisella tarkoitetaan tuotantolaitoksen irtoamista verkossa tapahtuvasta, ohimenevästä ilmiöstä, joka aiheuttaa suojausten asetteluarvojen ylittymisen ja tuotantolaitoksen irtoamisen. Tilanne voi johtua esimerkiksi jännitekuopasta tai taajuudenmuutosnopeuden ylityksestä. LoM-suojille on ollut tyyppilistä ajoittaiset turhat irtoamiset, johtuen juuri siitä, että riittävän varman suojausten ja turhien irtoamisten välttäminen on aina kompromissi. Varsinaista sähköturvallisuusvaaraa turhasta irtoamisesta ei aiheudu. Jos tuotantoyksiköitä olisi enemmän, niin jokin ohimenevä ilmiö voisi näkyä useamman tuotantolaitoksen irtoamisen seurauksena voimakkaampana, kuin ilmiö itsessään. Tämä ei ole toivottavaa järjestelmän kannalta.

5.3 Pientuotannon aiheuttamat riskit ihmisille

Edellisessä luvussa tarkasteltiin pientuotannon vaikutusta suojausten toimintaan. Suojausten tarkoituksena on niin ihmisten kuin komponenttienkin suojaus. Tässä yhteydessä arvioidaan ihmisille koituvaa riskiä.

5.3.1 Sähkön käyttäjät

Sähkön käyttäjille pientuotantolaitos ei muodosta erityistä riskiä, mikäli laitteita ei ala itse kytkemään tai purkamaan. Tilanne ei siis eroa normaalista sähkölaitteen käytöstä. Todennäköisempi tuotantolaitoksen aiheuttama riski lienee välillinen, ei-sähkötekniinen riski, kuten katolta putoaminen paneelia puhdistettaessa. VVS:sta löytyy suojaustoiminnot myös sen omissa järjestelmissä tapahtuvien vikojen havainnointiin, jolloin esimerkiksi vika johonkin maadoitettuun osaan järjestelmää huomataan. Edellisessä luvussa käsitellyt suojausten toimimattomuudet voivat toki muodostaa suurentuneen riskin kosketusjännitteille verkon vikatapauksissa. Laiterikon riski voi muodostua, jos jännite ja taajuus poikkeavat

jostain syystä määritellyistä rajoista, eikä tuotantolaitos irtoa, jolloin periaatteessa laiterikon kautta voisi muodostua sähköturvallisuusriski myös sähkökäyttäjille. Eri asia on, kuinka todennäköisenä tällaista tapahtumaketjua voidaan pitää.

5.3.2 Sähkötyöhenkilöstö

Suurin riski mikä verkostoasentajille pientuotantolaitteistoista aiheutuu, on takasyötön vaara. Näin voisi käydä, mikäli LoM-suojaus ei toimi tai tuotantolaitos yrittää käynnistyä jännitteettömään verkkoon. Tuotantolaitteistolle on oltava pääsy ja se on varustettava erotuslaitteella, jossa näkyvä ja lukittava erotusväli (ET 2011a). Jos tuotantoyksiköitä olisi vähänkin enemmän, aiheutuisi niiden erottamisesta suhteellisen paljon lisätyötä. AMR-mittareiden hyödyntäminen on myös harkinnan arvoista. Vian piirissä olevat käyttöpaikat voisi erottaa kokonaan verkosta valvomosta käsin sen sijaan, että paikalla on käytävä fyysisesti. Toisaalta yhteyden saaminen AMR-mittareihin voi joskus epäonnistua ja johdon ollessa poikki PLC:llä tapahtuva kommunikointi ei toimi. Työmaadoitusten tekeminen kohteen molemmin puolin on yksi varma keino, mutta erityisesti ilmajohtoverkossa tästä koituu lisätyötä. PJ-verkkojen työmaadoittaminen voi kuitenkin olla tarpeen jatkossa yhä useammin. Seuraavasta luvusta käy ilmi, että riski on olemassa ilman täysin määräysten mukaisesti toimivia ja asennettuja tuotantoyksiköitäkin.

5.3.3 Luvattomat tuotantolaitokset

Suomessa sähkön ”varastaminen” ei ole ongelma toisin kuin joissakin maissa, mutta luvattomasti asennettua tuotantoa Suomessakin on. Vaikka toiminta kiellettyä onkin se ei poista verkostoasentajiin kohdistuvaa riskiä. Erityisesti pitkät katkot ovat saattaneet ajaa ihmiset kekseliäiksi, mutta verkon kanssa rinnankäyvää tuotantoa löytynee useammankin verkkoyhtiön käyttöpaikoista ilman poikkeustilanteitakin. Tällaiset tapaukset eivät välttämättä paljastu, ennen kuin sähkötapaturma sattuu. Tällaiset käyttöpaikat eivät välttämättä myöskään erotu millään tavalla normaalissa käyttötilanteessa. Luvattomasti kytketty tuotanto voi aiheuttaa monia ongelmia ja pahimmassa tapauksessa hengenvaaran niin käyttäjille kuin verkostoasentajillekin.

Verkkoon syöttäminen ei ole ongelma, mikäli siitä on verkkoyhtiön kanssa sovittu ja mikäli syöttöä ei ole sähköttömään verkkoon. Myös oman käyttöpaikan ajaminen saarekkeessa on luvallista, kunhan käytetään verkonvaihtokytkintä. Varavoimakäyttöön liittyvät asennukset, kuten muutkin sähköasennukset (pl. jokaiselle sähkökäyttäjälle sallitut käyttö- ja korjaus-/asennustyöt) voi suorittaa vain pätevätyt henkilö. Pääasia on, että verkossa ei ole tuotantoa, josta verkkoyhtiö ei tiedä. Tuotantolaitosten ohella itsekytketyt varavoimageneraattorit aiheuttavat riskin. Näitä kytketään eniten silloin, kun verkossa on vika, eli juuri silloin kun on todennäköisintä, että joku saa sähköiskun. SFS 6002-standardissa todetaan, että työmaadoittaminen voi olla tarpeetonta pienjännitteellä, ellei ole riskiä jännitteiseksi tulosta (SFS 6002). Riskittömyyttä on hankala todeta. Verkko voi olla jännitteetön, mutta työn aikana joku voi kytkeä omin luvuin generaattorin verkkoon. Oma lukunsa on myös luvattomasti kytketyn tuotannon ja kiinteistön sisäisen suojauksen toiminta varavoimasyötön aikana. Joka tapauksessa, oman edun tavoittelu siten, että se aiheuttaa toisen työmaalle hengenvaarallisen riskin, on vastuutonta.

6 Pientuotannon liittämisen prosessin arviointi

Tähän mennessä työssä on käyty läpi pientuotantomuotoja, niiden potentiaalia, verkkoon liittämisen vaatimuksia ja sähköturvallisuusasioita. Tämän luvun tarkoituksena on arvioida nykyisen pientuotannon verkkoonliittämisen prosessin pääkohtia verkkoyhtiön, asiakkaan sekä standardoinnin näkökulmasta. Osana arviointia vertaillaan Suomessa ja Saksassa voimassa olevia standardeja. Luvussa esitetään myös ideoita prosessin kehittämiseksi.

6.1 Pientuotannon liittämisesimerkit

Pientuotannon verkkoonliittäminen voi onnistua täysin ongelmitta, se voi edellyttää merkittäviä toimenpiteitä verkkoyhtiöltä tai se voi olla mitä tahansa edellä olevien väliltä. Tässä luvussa esitetään kaksi ääriesimerkkiä pientuotannon liittämisenestä.

6.1.1 Optimistinen esimerkki

Asiakas on hyvissä ajoin yhteydessä kunnan rakennusviranomaisiin ja verkkoyhtiöön ja haluaa liittää suhteellisen pienikokoisen tuotantoyksikön käyttöpaikkaansa. Laitteisto täyttää vaadittavat kriteerit, verkkoyhtiö kelpuuttaa sen liitettäväksi, se on käyttöönottotarkastettu ja tuottaa pääasiassa vähemmän kuin mitä on asiakkaan keskiteho. Verkkoyhtiön kanssa on sovittu ylijäämänsähkön syötöstä verkkoon. Kyseisen alueen PJ-verkko on riittävän jäykkä eikä muutaman kVA:n tuotantoyksikkö häiritse suojausta. Verkkoyhtiö tietää kyseisessä kohteessa olevan tuotantoa ja asiakas pienentää sähkölaskuaan omalla tuotannolla.

6.1.2 Pessimistinen esimerkki

Maatilan isäntä on selvittänyt mahdollisuuksia biovoiman tuotantoon. Maatila on suhteellisen pieni, eikä sähkön kulutus ylitä 30 MWh:a vuodessa, mutta metsänhoitotoiminnasta kertyvää hukkapuuta on tarkoitus hyödyntää lämmön ja sähköntuotannossa. Ympäristölupaa ei tässä tapauksessa tarvita, pelkkä rakennuslupa riittää, joten toimeen on mahdollista ryhtyä nopealla aikataululla. Verkkoyhtiön näkökulmasta tilanne on erilainen. Runkojohdolta on liittymä naapurille. Ja-

kelumuuntaja on liian pieni, vaihdettavaa johtoa on lähes kilometri, tuotanto vaihtelee, samoin jännite johdolla ja tuotantolaitos pystyy sokaisemaan olemassa olevan sulakesuojauksen. Verkon vahvistuskuluja ei saa maksattaa isännällä. Tuotantoa olisi enemmän kuin isäntä käyttää ja hän haluaa myydä ylijäämä sähköä sopuhintaan naapurille.

Verkonosa on ollut sähkötekniisesti täysin toimiva, kenties hieman ylimitoitettu nykytilanteessa jo jonkun aikaa jatkuneen alueen (syrjäseutu) negatiivisen kasvuennusteen vuoksi ja pitoajaltaan loppupuolella, mutta ei vielä saneeraustarpeessa, eikä riittävän ylimitoitettu tuotantoyksikköä varten. Nyt verkkoon tulisi liittää nykyistä muuntajakonetta suurempi tuotantoyksikkö ja asiakas haluaisi vielä ryhtyä toimintaan, joka tarkoittaa sähkömarkkinalain mukaan sähkön myyjää, vieläpä pienimmällä mahdollisella volyymillä eli yhdellä asiakkaalla. Lisäksi tilanne tarkoittaa verkkoyhtiön näkökulmasta sitä, että ongelmia ja kustannuksia koituu sellaisesta toiminnasta, joka toteutuessaan pienentäisi saatua tulovirtaa. Asiakkaalla ei välttämättä aina ole ymmärrystä verkkoyhtiön suuntaan.

Esimerkeistä puuttuu välivaiheita ja erityisesti pessimistisen (karrikoidun) esimerkin tapauksessa asia on edennyt väärin heti alusta asti. Esimerkit kuitenkin osoittavat sen, että sovellettavuus voi nykyisellään vaihdella täysin ongelmattomasta tapauksesta lähes mahdottomaan tai ainakin järjettömään tilanteeseen.

6.2 Verkkoyhtiön näkökulma

Liittämiseen vaikuttaa niin liitettävä laitteisto, kuin kyseisen kohteen verkko. Verkkoyhtiön kannalta liittämisen haasteellisuuteen vaikuttavat oleellisesti:

- Muuntajan nimellisteho
- Liitettävän tuotantoyksikön koko ja liityntätapa
 - tehoelektroniikka/suoraan liittyvät (tahti-/epätahtig.)
- Muuntopiirin rakenne, asiakkaat ja pienimmät 1v-oikosulkuvirrat
 - mahdolliset muut tuotantoyksiköt
 - mitä tyyppikäyttäjää lähdöllä on

- maadoitukset, kosketusjännitesuojauksen toteutuminen
- Jännitejäykkyys
 - jännite loppupäässä
 - sähkön laatu (välkyntä, nopeat jännitemuutokset)
- Verkon senhetkinen käyttöikä
 - vahvistamistarve, nykykäyttöarvon menetys
 - komponenttien kestoisuus (terminen, oikos.)

Mahdollisten kombinaatioiden määrä on näitä muuttujia varioimalla melkoinen suomalaisissa pienjänniteverkoissa. Mahdollisia keinoja vastata tuotantolaitoksen aiheuttamiin tarpeisiin, lähtien yksinkertaisimmasta päästä, on listattu alla:

- (Tuotannon rajoittaminen)
- Sulakkeiden vaihto
- Välisulakkeiden käyttö
- Vikavirran rajoittimet
- Suunnatut releet
- Verkon jakaminen / oma lähtö tuotantolaitokselle
- Verkon vahvistaminen
 - muuntajakoko
 - johtimen poikkipinta

Pientuotannon aiheuttamat ilmiöt ovat samoja mitä verkoissa on ennenkin ollut. Keinotkaan eivät ole uusia. Sen sijaan, ilmiön lähde, sijoittuminen, vaikutusalue ja voimakkuus hankaloittavat haasteisiin vastaamista.

Nykyiset VTJ:t eivät suoranaisesti kykene simulointiin. Kuormitusten suunnittelun lisäksi myös vikatilanteiden tarkastelu on tarpeen, vaikka tuotantolaitoksen tulisikin irrota suojausasettelujen mukaisesti. Ongelma ei vielä ole akuutti, mutta erityisesti useamman samalle lähdölle liitetyn tuotantolaitoksen yhteisvaikutusten tarkasteleminen voi edellyttää simuloinnin hyödyntämistä.

Uutta verkkoa rakennettaessa pientuotannon vaikutusta mitoittavaan huipputehohon tuskin voidaan huomioida, sillä asiakas ei ajattele asiaa verkon näkökul-

masta. Tuotantoa voi olla tai sitten ei. Jos tuotantoyksiköitä olisi muuntopiirissä useampia, todennäköisesti jonkinlaista tasoittumista tapahtuisi, mutta siltikään ei voitaisi varmistua siitä, etteikö joskus PJ-verkon omatuotanto olisikin nolla. Toisaalta, mikäli tulevaisuudessa käytetään kaistatyyppejä, tehopohjaisia tariffeja, niin tällöin asiakkaallakin tulisi olla joku näkemys siitä kuinka omaa tuotantoa ajetaan, eli kuinka paljon verkosta otetaan sähköä. Tähän kannustanee taloudelliset perusteet. Pientuotanto voi siis vähentää investoitavan tai olemassa olevan verkkokapasiteetin käyttöä, mutta mitoittavaan tehoon se ei vaikuta. Lisäksi vahvistustarpeita voi tulla pelkästään suojaussyistä.

Aiheutuuko seuraavasta tapahtumaketjusta jännitteen laadullisia tai stabiiliusongelmia:

- 1) Jakelumuuntajan PJ-verkkoon syöttämä teho on lähellä nollaa
- 2) PJ-verkossa tapahtuu vika
- 3) Tuotantoyksiköt irtoavat
- 4) Syötettävä teho muuttuu nolasta oikosulkutehoksi?

Todennäköisesti ei aiheudu, koska tilanne on hyvin pitkälle sama kuin pienen kuormituksen aikaan tapahtuvassa viassa. Suojauksen toimivuus voi tällaisessa tapauksessa hidastua, jos tuotantotehoa on sen verran, että irtoaminen tapahtuu vasta LoM-suojauksen toiminnasta. Todennäköisempää kuitenkin on, että verkossa tapahtuvaan vikaan havahtuisi tuotantolaitoksen alijännitesuojaus tai ylivirtasuojaus.

Sulake on suojalaitteena varma, yksinkertainen, laajalti käytetty ja edullinen. Älykkäämpi relepohjainen suojaus kykenisi päättelemään tilanteen paremmin. Se kuitenkin tarkoittaisi eräänlaista ”mullistusta” sähköverkkotoiminnan saralla. Hinta, todellinen tarve ja ainakin osittainen suojaustoimintojen päällekkäisyys asiakaspisteestä löytyvän tai jatkossa löydettävän laitteiston kanssa ovat suurimmat syyt miksi relepohjaisen suojauksen hyödyntämistä PJ-verkoissa ei ainaakaan vielä voi pitää realistisena. Lisäksi juuri tehdyn ”mullistuksen”, AMR-mittareiden tehokas hyödyntäminen on vielä kesken. Muuntaja-automaatiota on

pilotoitu myös Suomessa ja siitä on saatu ilmeisen hyviä tuloksia (Viola Systems). Voi olla, että tehty automaatiohyppy KJ-verkosta suoraan asiakaspisteseen ei riitä ja tulevaisuudessa joudutaan vielä palaamaan jakelumuuntamolle. Syitä voivat olla esimerkiksi pientuotannon laajan yleistymisen aiheuttamat suojaustekniset syyt, tarve PJ-verkon paremmalle tilaseurannalle kuin mitä AMR:n avulla on mahdollista toteuttaa tai mikrogridin asettamat vaatimukset. Ainakaan toistaiseksi sitä ei voi nähdä ajankohtaisena, mutta painopisteen siirtyessä PJ-verkkoihin voi tilanne olla toinen.

Jos tuotantolaitos vaikuttaa vain normaaleissa käyttötilanteissa, niin sulakesuojaus toimii vikatilanteissa kuten ennenkin. Voidaanko kuitenkin varmistua siitä, että tuotantoyksikön suojaus toimii? Niin täytyy olla, koska perinteisten suojausmenetelmien toimivuuden ja sähköturvallisuuden takaamiseksi pientuotantolaitteiston tulee osallistua mahdollisimman vähän vikatilanteisiin. Näin pitäisi olla myös käytännössä, jos laite on testattu tiettyjen asetteluarvojen mukaisesti. Laitevalmistajalta useimmiten saa suurimpien markkina-alueiden standardien mukaisesti testattuja tuotantolaitteistoja. Suomessa on omat vaatimukset asetteluarvoille, jolloin verkkoyhtiön tehtäväksi jää soveltaa SFS-EN 50438:n mukaisia arvoja. Asetteluarvojen muutos voi aiheuttaa laitevalmistajan antaman vaatimuksenmukaisuusvakuutuksen menettämisen eikä Suomessa ole omaa laitestandardia vaatimusten testaamiseksi.

6.3 Asiakkaan näkökulma

Rakennusluvan saaminen voi kunnasta ja paikasta riippuen vaihdella. Joissain kunnissa tuotantolaitoksen voi asentaa ilmoitusmenettelyn kautta tai tuotantomuodosta riippuen, se voi vaatia toimenpideluvan, rakennusluvan tai jopa YVA-menettelyn. Varmuus siitä, onko oikeutettu saamaan investointitukea tai muita mahdollisia helpotuksia ei välttämättä selviä suoraan annettujen määrittelyjen pohjalta (Finlex, 1397/2010). Asiantuntijan apu voi olla tarpeen byrokratian selvittämiseksi.

Pientuotannolla tuotetun sähkön myynti ei kannata, koska tuotanto on useimmiten vähäistä ja epävarmaa. Lisäksi asiakkaan tulisi löytää itselleen asiakas, jolle myydä sähköä. Tästä sähköstä tulisi maksaa verkkoyhtiölle siirtomaksua 0,07c/kWh ja sähkön myyjän pitäisi suoriutua myös tasehallinnasta (Lehto 2009). Nykyiset realistiset vaihtoehdot käyttöpaikan osalta ovat siis:

- 1) tuotanto on pienempi kuin kulutus
- 2) sopimus verkkoyhtiön kanssa ylijäämänsähkön verkkoonsyötöstä, todennäköisesti korvauksetta.
- 3) epätodennäköisin, mutta mahdollinen vaihtoehto on myös osto-myyntisopimus (Lehto 2009)

Verkkoyhtiö on ensimmäinen tai ainakin ensimmäisten tahojen joukossa, jonka puoleen käännetään tuotantolaitoksen hankkimisprosessissa. Asiakkaan tulee hankkia tieto siitä, millaisen tuotantolaitoksen verkkoon voi liittää. Verkkoyhtiön on liitettävä tuotantolaitos verkkoon, jos se täyttää tekniset reunaehdot. Jos tekniset reunaehdot täyttyvät, ei verkon mahdollinen vahvistamistarve koske asiakasta. Verkkoyhtiön ilmoittamien vaatimusten mukaisen tuotantolaitteiston hankkiminen voi kuitenkin olla hyvin hankalaa. Tieto tuotantolaitoksen takaisinmaksuajasta ja riski vääränlaisen tuotteen ostamisesta ei kannusta tekemään investointia. Tuotantolaitteistot on yleensä sertifioitu suurempien markkina-alueiden mukaisesti. Suomen kokoisella markkina-alueella tuskin on mahdollisuuksia saada laitevalmistajia testaamaan laitteita myös Suomen rajojen mukaisesti. On kohtuutonta vaatia asiakaskohtaista tyyppitestausta sillä viimeistään se tekee pientuotantoinvestoinnista kannattamattoman. Jäljelle jää vaihtoehto, että verkkoyhtiö antaa luvan tuotantolaitoksen liittämiseksi.

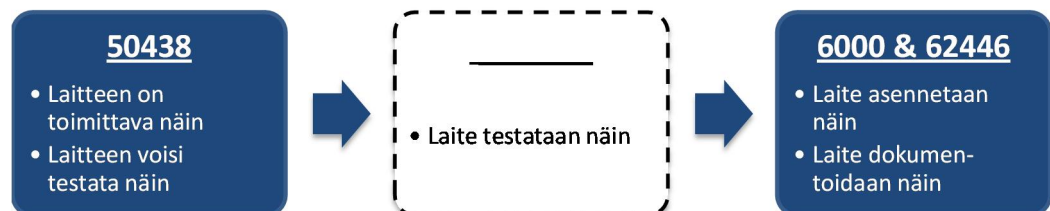
Nykyisessä tilanteessa tuotannon verkkoonliittämisprosessi koskee käytännössä vain asiakasta ja verkkoyhtiötä. Koska SFS-EN 50438:n ehtojen täyttäminen aiheuttaa haasteita molemmille toimijoille, on asiaa tarkasteltu seuraavassa luvussa tarkemmin.

6.4 Liittämisprosessissa käytettävät standardit

Tässä luvussa käydään läpi liittämisprosessissa sovellettavat tärkeimmät standardit. Aukottoman standardiselvityksen tekeminen tähän yhteyteen on mahdotonta, sillä aihepiiriin liittyviä standardeja on olemassa lukuisa määrä. Kuitenkaan tyyppitestaukseen sovellettavaa laitestandardia ei Suomessa ole.

6.4.1 Suomessa käytettävät standardit

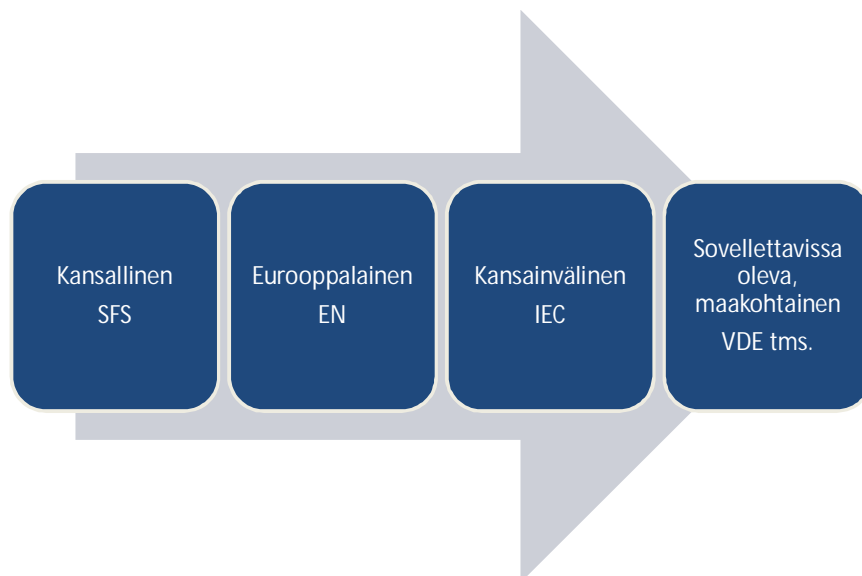
Standardin SFS-EN 50438 mukaan tuotantolaitteistoilla tarkoitetaan Suomessa nimellistehoaltaan alle 30 kVA:n yksiköitä (SFS-EN 50438). Standardissa annetaan irtoamisrajojen lisäksi vain suositusluontoisia ohjeita siitä, kuinka vaadittujen ehtojen toteutuminen tulisi todentaa (SFS-EN 50438). Tyyppitestauksen tarkoituksena on todentaa, että laite täyttää vaadittavat ehdot. Tyyppitestauksella ei tarkoiteta käyttöönottotestausta, vaan käyttöönottotestaus on tehtävä erikseen asennuksen yhteydessä. Tässä tapauksessa laitteelle vaatimukset asettava standardi on SFS-EN 50438. Laitteen asennukseen on olemassa SFS-600-sarja, josta esimerkiksi luku 6000-7-712 käsittelee aurinkosähköisiä tehonsyöttöjärjestelmiä (SFS 6000). Lisäksi on olemassa standardi SFS-EN 62446 *Sähköverkkoon kytkeytyvät valosähköiset järjestelmät. Minimivaatimukset järjestelmän dokumentaatiolle, käyttöönottotesteille ja tarkastuksille* (SFS-EN 62446). LoM-suojauksen testaamiseksi on olemassa standardi SFS-EN 62116 *Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters*. (SFS-EN 62116). Se kattaa siis vain saarekekäytön estosuojauksen testauksen, jonka vuoksi se ei riitä. Standardin SFS-EN 50438:n ehtojen toteutumisen täsmälliseksi todentamiseksi ei ole standardia Suomessa. Kuva 6.1. selventää tilannetta.



Kuva 6.1. Tuotantolaitoksen liittämisprosessin eri vaiheissa sovellettavia standardeja. Testausstandardin puute on ilmeinen.

SFS-EN 50438:ssa sanotaan, että verkkoyhtiö voi poiketa rajoista tapauskohtaisesti, joten liittäminen on mahdollista, mikäli verkkoyhtiö sen sallii. Lisäksi sanotaan, että rajat on määritetty ottaen huomioon laitoskoko, ominaisuudet ja käytännön kokemukset. Aiheuttaako näistä rajoista poikkeaminen ongelmia tai sähköturvallisuusriskiä, jos niitä voidaan joka tapauksessa soveltaa tapauskohtaisesti? ENSTO-E:n luonnoksessa todetaan, että luokan A laitteille luonnoksessa määritettyjen tyyppitestauksen sijasta (osan tai kaikkien) voidaan käyttää valmistajan tyyppihyväksyntää, mikäli verkko-operaattori ne hyväksyy. Luonnoksessa esitetty testi ja sen kuvaus on suppea. (SFS-EN 50438; ENTSO-E 2012)

Tukes:n sivuilla on sanottu pienjännitedirektiivin noudattamisesta seuraavasti: *”Jos yhdenmukaistetut standardit puuttuvat, vaatimustenmukaisuus voidaan osoittaa kansainvälisten IEC- ja CEE-standardien mukaan. Kansainvälisten standardien puuttuessa voidaan käyttää kansallisia standardeja.”* (Tukes 2012). Tarkempi määritys löytyy pienjännitedirektiivin 2006/95/EY artiklasta 7 (EU 2006). Sivuhuomautuksena, lainsäädäntöpuutteen (New Legislative Framework, NLF) mukaan pienjännitedirektiivi on yhtenä mukauttamisen kohteena tuotedirektiivien yhtenäistämisen prosessissa, joka alkoi 2010 (TEM 2012b). Standardien noudattaminen etenee siis alla olevan kuvan 6.2 mukaisesti.



Kuva 6.2. Standardien soveltamisen etenemiskaavio.

Tässä tapauksessa ei voi sivuuttaa saksalaisten standardien tarkastelua, koska niillä on liitetty suuri määrä erityisesti aurinkovoimaa. Lisäksi saksalaisten sähköverkkojen rakenne, esimerkiksi maadoitukset ja jännitetasot, ovat käytännössä Suomea vastaavat.

6.4.2 Saksassa käytettävät standardit

Saksassa on käytetty vuonna 2006 voimaantullutta standardia VDE V 0126-1-1, *Selbsttätige Schaltstelle zwischen einer netzparallelen Eigenerzeugungsanlage und dem öffentlichen Niederspannungsnetz*, (vapaamuotoinen käännös: automaattinen erotuslaite tuotantolaitteiston ja julkisen pienjänniteverkon välissä) automaattisen erotuslaitteen ja sen tyyppitestauksen määrittämiseksi. Erityisesti 50.2 Hz ongelman takia oli tarpeen päästä eroon VDE V 0126-1-1:n mukaisesta, kiinteästä ylitaajuusraja-irtoamisesta. Saksalaisessa pienjänniteverkkokoodissa VDE-AR-N 4105 on otettu tämä huomioon. Vuoden 2012 alusta lähtien tuotantolaitosten liittämiseksi on sovellettava standardia VDE-AR-N 4105, *Power generation systems connected to the low-voltage distribution network. Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks*, (Pienjänniteverkkoon liitetyt tuotantojärjestelmät. Tekniset vähimmäisvaatimukset pienjänniteverkkoon liittämiseen ja rinnankäyttöön) ja kaikkien PJ-verkkoon asennettavien tuotantolaitosten on oltava sen mukaisia heinäkuusta 2012 alkaen. Merkittävimpiä eroja edeltävään on mm. 50.2 Hz ongelman välttäminen, loistehovaatimukset ja laitoskokoluokittelu. Uudessa standardissa on lisäksi otettu huomattavasti tarkemmin kantaa koko liittämisprosessiin. (VDE V 0126-1-1; VDE-AR-N 4105)

Useamman laitevalmistajan tuotteesta löytyy maininta, että se on sertifioitu standardin mukaiseksi, jolloin laitetta hankkiessaan asiakas voi olla varma, että se soveltuu verkkoon, kun tuotteella on VDE-AR-N 4105 sertifikaatti. Lisäksi joiltakin laitevalmistajilta löytyy suoraan laitteen valikosta maakohtaiset asetteluarvot suurimpien maiden mukaisesti (Saksa, Espanja, Italia ym.). Markkinaalueena Saksa on monelle laitevalmistajalle hyvin merkittävässä roolissa, jolloin on myös luonnollisesti kannattavaa edistää oman tuotteen myyntiä sertifikaatin

avulla ja pienentää näin asiakkaiden ostokynnystä. VDE-AR-N 4105:n vaatimusten täyttämiseksi on olemassa standardi VDE V 0124-100 *Grid integration of generator plants - Low-voltage - Test requirements for generator units to be connected to and operated in parallel with low-voltage distribution networks* (tuotantolaitosten verkkoon liittäminen –pienjännite – testausvaatimukset tuotantoyksiköiden liittämisestä ja käyttämisestä rinnan pienjännitteisten jakeluverkkojen kanssa) (DIN 2012). Se korvaa VDE-1-1-0126:n, koska siitä on sanottu näin: “*This DIN-VDE-pre-standard serves to verify the electric requirements for generator units fixed in VDE-AR-N 4105 and other grid connection provisions, if applicable*” (tämän esistandardin tarkoituksena on varmistaa VDE-AR-N 4105:ssä määrättyjen tuotantoyksiköiden sähköiset vaatimukset ja muut verkkoonliittämismääräykset, jos mahdollista) (DIN 2012).

6.4.3 Suomalaisen ja saksalaisten standardien vertailu

Tässä luvussa käydään verrataan suomalaisia ja saksalaisia standardeja ja huomioidaan lisäksi ENTSO-E:n verkkokoodissa kategorian A laitteille esitetyt asetteluarvot. Seuraavassa taulukossa on esitetty suurimmat erot SFS-EN 50438:n, VDE-1-1-0126:n ja VDE-AR-N 4105:n raja-arvojen välillä.

Taulukko 6.1. Mikrotuotannolle standardissa SFS-EN 50438 määritetyt löysennetyt (=ET:n ohjeessa alle 50 kVA:n tuotantolaitoksille esitetyt) VDE-1-1-0126:n ja VDE-AR-N 4105:n mukaiset asetteluarvot. (ET 2011a; VDE-1-1-0126; VDE-AR-N 4105)

Parametri	Toiminta-aika	Suomi	Saksa	
			0126	4105
Ylijännite	≤ 0,2 s	$U_N + 10\%$	$U_N + 15\%$	$U_N + 10\%*$
Alijännite	≤ 0,2 s	$U_N - 15\%$	$U_N - 20\%$	$U_N - 20\%$
Ylitaajuus	≤ 0,2 s	51 Hz	50.2 Hz	51.5 Hz**
Alitaajuus	≤ 0,2 s	48 Hz	47,5 Hz	47,5 Hz
LoM		≤ 5 s	≤ 0.5 s	≤ 5 s

* Integroitu suojalaitte, ≤ 30 kVA

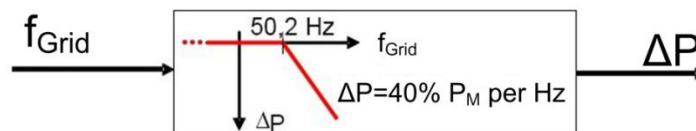
** 50.2 Hz alkaen 40%/Hz pätötehon vähennys

ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa kategorian A taajuusrajat ovat seuraavat (ENTSO-E 2012):

- 47,5-48,5 Hz, pysyttävä verkossa vähintään 30 min
- 48,5-49,0 Hz, TSO päättää, ei alle 30 min
- 49,0-51,0 Hz, pysyttävä verkossa vähintään 30 min
- 51,0-51,5 Hz, pysyttävä verkossa vähintään 30 min
- Riippuen TSO:n päätöksestä, alkaen välillä 50,2-50,5 Hz, 2-12%:n lineaarinen pätötehon vähennys (droop)

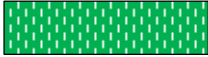
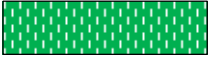





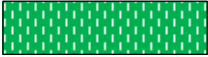
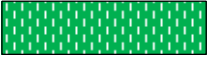

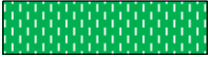
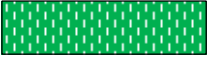
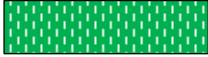
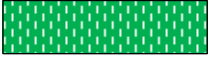

Jännitteelle ei ole annettu rajoja, eikä myöskään LoM-suojaukselle muuta ohjetta kuin että irrota saa taajuusmuutoksista, jotka ovat alle 2 Hz/s, vain LoM-suojauksen toiminnan seurauksena (ENTSO-E 2012).

Suomessa on irrottava aiemmin yli-/alitaajuudesta ja alijännitteestä. Saksassa ylitaajuusrajaan liittyy pätötehon vähennysvaatimus (VDE 2012). Ylitaajuustilanteessa tuotantolaitokselle muodostuu oma statiikka kuvan 6.3 mukaisesti.



Kuva 6.3. Pätötehon vähennys ylitaajuustilanteessa Saksassa. f_{Grid} on verkon taajuus, P_M on tuotantolaitoksen senhetkinen teho, jolloin f_{Grid} ylittää 50,2 Hz ja ΔP on pätötehon muutos. (VDE 2012)

Tuotantolaitokselle siis muodostuu taajuusrajan ylityshetkellä statiikka, jonka mukaan sen pätötehon tuotanto vaihtelee taajuusalueella 50,2-51,5 Hz. Pätötehon 40%:n muutos Hertziä kohden tarkoittaa 5% drooppia. Saksan taajuusasettelut vastaavat ENTSO-E:n luonnoksessa esitettyjä arvoja ja Suomen ylijänniteasettelu Saksan ylijänniteasettelua. Lisäksi saksalainen standardi vähentää pätötehoa ylitaajuustilanteessa, kuten verkkokoodiluonnoksessa vaaditaan. Alla olevassa kuvassa 6.4 on esitetty kuinka standardit vastaavat toisiaan.

	Suomi SFS-EN 50438	Saksa VDE-AR-N 4105	ENTSO-E Draft 24.1.2012
Ylijännite			
Alijännite			
Ylitaajuus			
Alitaajuus			
LoM			

Kuva 6.4. Standardien keskinäinen vastaavuus. Vihreät vastaavat keskenään toisiaan ja punaiset ovat ristiriidassa keskenään. Valkoisella merkityt eivät ota kantaa.

Arvoista taajuusasettelut kiinnostanevat eniten Fingridiä ja jänniteasettelut sekä LoM-suojien toiminta paikallista verkkoyhtiötä. Verkkoyhtiön näkökulmasta ristiriita on alijänniterajassa. Fingridin VJV ei ota kantaa näin pieniin tuotantolaitoksiin, mutta alitaajuusraja 47,5 Hz on kuitenkin sama kuin VJV:ssä esitetty lopullinen irtoamisraja (Fingrid 2007). Ylitaajuuden osalta VJV:ssä on esitetty pätötehonvähennys, max. 10% välillä 50,3-51 Hz (Fingrid 2007).

Mikäli tuotantolaitteelle on annettu jonkun standardin mukainen sertifikaatti, niin laitevalmistaja ei välttämättä vastaa enää toimivuudesta, jos näitä asetteluja muutetaan. Näin voi käydä esimerkiksi Suomessa, kun laitetta ollaan liittämässä verkkoon. Tilanne on siis seuraava:

- Laitevalmistajalta saa tiettyjen asetteluarvojen mukaisen laitteen
 - Suomessa halutaan omien asettelujen mukaisesti toimiva laite
 - Asettelujen muuttamisen jälkeen sertifiointi todennäköisesti menetetään
 - Suomessa ei ole standardia, minkä mukaan laite testattaisiin
 - Vaikka standardi olisikin, niin Suomi todennäköisesti on liian pieni markkina, jotta meitä varten tehtäisiin omat sertifiointit
- Ongelma!

Onko ongelma verkkoyhtiön vai asiakkaan? Se on tällä hetkellä molempien ongelma. Asiakkaalle se näkyy epävarmuutena laitehankintaa tehdessä ja verkko-

yhtiölle tilanne on joka ikisen liittyjän kohdalla tapauskohtainen, joka taas kuluttaa verkkoyhtiön resursseja liittämiprocessissa ja voi näkyä mm. pidentyneinä käsittelyaikoina. Nykyinen tilanne heikentää entisestään pientuotannon asemaa. Saksalaisen standardin käyttöä puoltavat seuraavat seikat:

- Saksalaisten standardien mukaan on liitetty pelkästään paneeleja yli miljoona
- Saksalainen PJ-verkko ja kiinteistöasennukset eivät käytännössä eroa suomalaisista
- Saksalainen standardi käy yhteen ENTSO-E:n luonnoksen kanssa
- Raja-arvojen erot eivät johtane sähköturvallisuuden vaarantumiseen tai muihin ongelmiin Suomessa
- Markkina-alueena Saksa on laitevalmistajille yksi tärkeimmistä → valikoima
- Sertifiointi säilyy
- Asiakas tietää ostavansa oikean laitteen ja verkkoyhtiö tietää miten laite toimii

6.4.4 Johtopäätös standardin sovellettavuudesta

Tässä yhteydessä tehdyn tarkastelun perusteella ei ole syytä olettaa, että saksalaisen standardin mukaan tyyppitestatut laitteet aiheuttaisivat Suomessa käytettyinä erityisiä ongelmia vaan sen sijaan edesauttaisivat merkittävästi verkkoyhtiön ja pientuotantoa liittävästä asiakkaan toimintaa. Lisäksi laitteet vastaisivat ENTSO-E:n vaatimuksia. Mikäli saksalaisten standardien uudemmissa versioissa ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia tässä työssä käytettyihin standardiversioihin verrattuna, niin saksalaisten asettelujen mukaan tyyppitestattuja tuotantolaitoksia voisi sallia liitettävän myös Suomessa. Toinen vaihtoehto olisi, jos valmistaja testaisi kiinteän rajan sijasta ominaisuuden. Tällöin valmistaja vakuuttaisi, että laite toimii asettelu-arvojen mukaisesti jollakin asetteluvälillä ja asettelut voisi laittaa maakohtaisesti tai tarpeen mukaan tapauskohtaisesti.

6.5 Kehittämissuhteita liittämiproessiin

Kuntien rakennusjärjestykset kohtelevat pientuotannon liittäjää kunnasta riippuen eri tavoin. Tuulivoimaloita ei voi pystyttää mielivaltaisesti ja vesivoiman tai biovoiman ym. tapauksessa on huomioitava myös ympäristötekijät. Sen sijaan,

harkinnanarvoista olisi sallia asennettavaksi aurinkopaneeleita ilman erillistä lupaa tai ilmoitusmenettelyn kautta. Esimerkiksi lappeensuuntaisesti asennetut, suorakaiteen muotoiset, tiettyä pinta-alaa tai prosentuaalista osuutta kattopinta-alasta vastaavat, katon värisävyyn riittävän hyvin täsmäävät paneelit voisi sallia asennettavaksi ilman toimenpidelupaa, kunnasta riippumatta.

Alan maineeseen vaikuttaisi positiivisesti, jos sähkönmyyntiyhtiöt tarjoaisi pien-tuotantoa hankkivalle asiakkaalle osto-myyntisopimusta. Esimerkiksi Saksassa sähkölle on taattu ostaja. Mittaus onnistuu, jos AMR-mittarissa on kaksi rekisteriä.

ENTSO-E:n verkkokoodiluonnoksessa on sanottu, että verkko-operaattorin tulisi julkisesti asettaa saataville ne dokumentit ja informaatiovaatimukset, joita heille on toimitettava (ENTSO-E 2012). Tämä on todettu myös ET:n ohjeissa (ET 2012). Jos olisi olemassa tietty dokumentti, johon asiakas voisi hankkia laitevalmistajalta tarvittavat tiedot niin pidemmällä aikavälillä tämä helpottaisi myös verkkoyhtiön työtä. Tarkoituksena ei ole välttää yhteydenpitoa verkkoyhtiön kanssa. Asiakas pystyisi hankkimaan tarvittavat tiedot etukäteen ja sujuvuudenkin kannalta se edesauttaisi tilannetta, varsinkin jos liittämisprosessi on useamman kuin yhden asiakkaan kanssa kesken. Lisäksi se kannustaisi verkkoyhtiöitä pohtimaan, mitä tuotannon verkkoonliittämisessä on otettava huomioon.

Tyypitestaustestimenetelmästä on saatava tarkempi kuvaus tai hyväksyntä esimerkiksi saksalaisen standardin mukaan sertifioitujen laitteiden kelvollisuudesta myös Suomessa. Toinen vaihtoehto on, että valmistaja takaa toiminnan tietyllä asetteluvälillä. Nykyinen tilanne hankaloittaa niin verkkoyhtiön kuin asiakkaankin toimintaa.

7 Johtopäätökset

Pientuotanto on tärkeä osa älykkäitä sähköverkkoja ja siten merkittävässä roolissa energiatehokkuuspyrkimyksissä. Työssä on käyty läpi pientuotannon kannattavuutta ja tulevaisuuden näkymiä, tuotannon verkkoonliittämiskaavoituksia, verkon suojausteknisiä haasteita ja liittämisprosessia. Tämä kappale kiteyttää työssä tehdyt havainnot.

Selviä signaaleja pientuotannon lisäämiseksi ei ole annettu, vaikka pientuotanto nähdään tärkeäksi toiminnaksi tulevaisuudessa. Myös rakennuslaki kohtelee pientuotantoa liittäviä asiakkaita kunnasta riippuen vaihtelevasti. Sähkömarkkinalaki tukee verkkoonliittämistä, mutta ei takaa markkinoiden syntymistä pientuotannon ylijäämäsihköille. Nykyinen menettely, jossa ylijäämäsihkö vähentää verkkoyhtiön häviösihköjen hankintaa, on nähtävä väliaikaisena ratkaisuna, jonka tilalle tarvitaan pysyvä malli.

Työssä havaittiin, että pientuotannon suojaukselle asettamat haasteet riippuvat kyseessä olevan kohteen verkosta sekä liitettävästä laitteistosta, jonka vuoksi mahdolliset ongelmat ovat tapauskohtaisia. Lukumäärällisesti suurin osa tulee olemaan nimellisteholtaan huomattavasti alle mikrotootannon 30 kVA:n rajan, jolloin yksittäisten tuotantoyksiköiden liittäminen aiheuttanee harvoin ongelmia. Se, aiheutuuko juuri tietystä liitettävästä tuotantolaitoksesta suojausongelmia, on verkkoyhtiön selvittävä liittämisprosessin yhteydessä.

Pientuotantolaitteistojen sähkötyöhenkilöstölle aiheuttamaa sähköturvallisuusriskiä ja keinoja turvallisuuden takaamiseksi tulee tarkastella jatkossa. Päätös PJ-verkon työmaadoitusten tekemättä jättämisestä sisältää jatkossa yhä suuremman riskin PJ-verkkoon liitetyn tuotannon myötä. Jokaisen työkohteen alapuolella olevan tuotantolaitoksen erotusvälin avaamisen ja lukitsemisen sijaan voisi hyödyntää AMR-mittareita. Varsinkin, jos tuotantolaitoksia olisi enemmän, aiheuttaisi fyysisesti jokaisessa tuotantopisteessä käyminen huomattavasti lisätyötä.

Liittämisstandardissa SFS-EN 50438 esitettyjen vaatimusten todentamiseksi ei ole standardia, mistä aiheutuu haittaa niin asiakkaalle kuin verkkoyhtiöllekin. Laittevalmistajan sertifiointi menetetään, kun asettelut muutetaan. Tyyppitestauksesta tarvitaan standardi tai päätös siitä, että saksalaisen standardin täyttäviä tuotantolaitoksia voi liittää myös Suomessa. Toinen vaihtoehto on, että tyyppitestauksessa tarkastetaan suojausominaisuuden toiminta jollakin asetteluvälillä kiinteän rajan sijaan.

VVS on hajautetun tuotannon tärkein liittymistapa, joten sen suojausfunktioita yhdessä AMR:ien toiminnallisuuden kanssa kannattaa hyödyntää niin pitkälle kuin mahdollista ja välttää näin erillisten suojalaitteiden käyttö ja päällekkäiset ominaisuudet. VVS:n avulla on myös mahdollista vaikuttaa sähkön laatuun paikallisesti.

Teknisestä näkökulmasta keskeiset johtopäätökset ovat seuraavat: 1) suojauksen toimivuus on tarkasteltava kunkin verkkoyhtiön tapauskohtaisesti liittämisprosessin yhteydessä. Ongelmia ilmenee harvoin, jos liitetään mikrotuotantoa. 2) tahattoman saarekekäytön todennäköisyys on pieni. 3) PJ-verkon työmaadoittamista koskien tarvitaan uusi tarkastelu ja tarvittaessa muutos standardiin. 4) AMR-mittareita tulisi hyödyntää käyttöpaikkojen irrotuksessa työn ajaksi. 5) Tyyppitestaukseen liittyvään ongelmaan tarvitaan ratkaisu, esimerkiksi päätös saksalaisen standardin mukaan testattujen laitteiden hyväksymisestä.

Yksi aihepiirin tärkeimmistä jatkotutkimustarpeista on VVS:n toiminnan tarkastelu PJ-verkon vikatilanteissa erilaisin tuotantolaitosten sijainti-teho-lukumäärä-kombinaatioin. Sujuvan liittämisprosessin aikaansaaminen edellyttää myös valtakunnallisten toimintamenettelyjen kehittämistä liittämisluvan hakemiseksi ja tuotantolaitoksen teknisen vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseksi.

Liitteessä VII on esitetty koostava näkemys pientuotannon nykyisestä tilanteesta Suomessa. Varsinaisia esteitä pientuotannon liittämislupien hakemiseksi ei ole, mutta toimintamallit ja kannusteet puuttuvat.

8 Yhteenveto

Energiatehokkuusvaatimukseen vastaaminen tarkoittaa nykyisten toimintojen tehostamista ja uusien menetelmien käyttöönottoa. Älykkäillä sähköverkoilla pyritään mahdollistamaan uusia toimintoja ja sitä kautta parantamaan sähkönkäytön tehokkuutta. Pientuotanto on yksi tärkeimmistä älykkäiden sähköverkkojen osa-alueista ja monet muut toiminnallisuudet nojaavat pientuotantoon. Suomessa sähkön pientuotanto ei ole vielä yleistynyt. Pientuotannon liittämiseksi ei ole selviä teknisiä esteitä, mutta sujuva hyödyntäminen ei vielä onnistu.

Hajautettu tuotanto sisältää käsitteenä tulkinnanvaraa. Työssä tehtiin olemassa olevien rajojen pohjalta hajautetun tuotannon teholuokkakajo ja selvitettiin pientuotannon sijoittuminen hajautetun tuotannon aihepiiriin yleisesti. Tässä työssä pientuotannolla tarkoitetaan alle 100 kVA:n tuotantoa, joka on liitetty PJ-verkkoon ja joka sisältää mikrotuotannon, eli alle 30 kVA:n tuotannon.

Tuotantomuodosta riippuen, sen hyödyntämismahdollisuudet ja kannattavuus vaihtelevat paljon. Aurinkoenergian hyödyntäminen onnistuu vaivattomimmin. Lisäksi työssä havaittiin, että kunnan rakennusjärjestykset kohtelevat sähkön pientuottajaa tuotantomuodosta ja kunnasta riippuen vaihtelevasti.

Taloudellisia kannusteita ei pientuotannolle vielä ole. Suomessa sähkön hinta on kohtuullinen, jopa edullinen ja selviä poliittisia signaaleja pientuotannon lisäämiselle ei ole. Pientuotannon rooli sähkömarkkinoilla ei ole selvä tai ainakaan pientuotantoa tukeva. Älykkäiden sähköverkkojen myötä asiakkaiden rooli sähkönkäyttäjänä muuttuu aktiivisemmaksi. Älykkäät sähköverkot myös mahdollistavat pientuotannon luontevamman hyödyntämisen.

Työssä käytiin läpi tuotantolaitoksen liittämiseksi vaadittavia dokumentteja. Standardi SFS-EN 50438 yhdessä ET:n suositusten kanssa antaa pohjan pientuotannon liittämiseksi. Työssä tarkasteltiin myös mahdollisesti ENTSO-E:n verkkokoodin myötä tulevia vaatimuksia. ENTSO-E:n verkkokoodi on edelleen

luonnosvaiheessa, mutta merkittäviä muutoksia ei ainakaan luonnoksen myötä ole tulossa.

Pientuotantolaitos näkyy verkossa uutena syöttöpisteenä. Tähän muutokseen liittyvät kaikki sähköturvallisuus- ja suojaustekniset haasteet. Yhtenä työn tavoitteena oli laatia PJ-verkon simulointimalli, jolla voidaan tarkastella pientuotannon vaikutuksia sähköverkon suojaukseen. Pientuotanto pystyy vaikuttamaan vikavirran suuntaan, suuruuteen ja suojauksen toimivuuteen. Suojauksen toimivuuteen liittyvä riski on aina tapauskohtainen ja tarkastelu kuuluu verkkoyhtiön tehtäviin liittämisprosessin yhteydessä. Osassa tapauksista suojaukseen liittyviä haasteita ei ole ollenkaan ja toisissa tapauksissa haasteet voivat olla ongelmallisia. Pientuotannon sovellettavuus voi vaihdella Suomessa täysin ongelmattomasta hyvin ongelmalliseen. Useimmat liitettävät tuotantolaitokset ovat mikrotuotantoa ja tällaisista aiheutuu harvoin suojausongelmia. Lisäksi riski saarekkeen syntymiseksi ja pysymiseksi on todella pieni, kun suojaus on tehty asianmukaisesti.

Verkkoon liitettävälle laitteistolle, liittämistyölle ja dokumentoinnille on olemassa standardit ja ohjeet, mutta laitteistojen tyyppitestaukselle ei. Suomessa on omat vaatimukset verkkoon liitettävän laitteiston suojausasetteluille. Suomi on markkina-alueena pieni, jonka vuoksi suomalaisten asettelujen mukaisesti testattuja laitteita tuskin on mahdollista saada. Työssä tarkasteltiin saksalaisia standardeja, joita soveltaen on liitetty paljon erityisesti aurinkovoimaa. Työssä päädyttiin siihen lopputulokseen, että saksalaisen standardin mukaan tyyppitestatut laitteet tuskin aiheuttaisivat ongelmia myöskään suomalaisissa pienjänniteverkoissa.

Selviä esteitä pientuotannon yleistymiselle ei ole. On todennäköistä, että pientuotanto tulee yleistymään myös Suomessa. Nopeuteen vaikuttavat erityisesti teknologian kehittyminen, tuotantolaitteistojen hintojen aleneminen, pientuotantolaitteistojen käytön helppous sekä sähkön hinta. Edellä mainittujen lisäksi tukitoimilla voidaan merkittävästi kannustaa pientuotannon investoimiseen, kuten esimerkiksi Saksassa on tehty.

Lähteet

- ABB, 1990, Teknisiä tietoja ja taulukoita. 8. Painos. Vaasa Oy. ISBN 951-99366-0-2.
- ABB, 2009, Power & Automation, ABB OY:n asiakaslehti. ABB. [Saatavilla: http://abb.smartpage.fi/power209/pdf/ABB_209.pdf , viitattu: 24.12.2012]
- ABB, 2012, Kahvasulakkeet-esite. [Saatavilla: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/\\$file/1SCC317002C1801.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/$file/1SCC317002C1801.pdf), viitattu: 16.3.2012]
- Adrianti, -, Dysko, A., Burt, G., 2011, Probability Estimation of the Occurrence of Protection System Failures in Highly Distributed Generation Systems. Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International , vol., no., pp.1-6, 5-8 Sept. 2011. [Saatavilla: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6125581&number=6125473>, viitattu 21.3.2012]
- Bergman, J-P., Lankila, M., Kässi, T., 2005, Teknologiaohjelma DENSITY - Hajautetun energiantuotannon tulevaisuusskenaariot ja vaikutukset liiketoimintamalleihin. Tutkimusraportti. Technology Business Research Center Lappeenranta. ISBN 952-214-008-2. [Saatavilla: http://www.tbrc.fi/pubfile/DENSITY_Skenaariot_2019.pdf, viitattu: 20.11.2011]
- BSW Solar, Renewable Energy Sources Act (EEG) 2009, Important Changes and Feed-in Tariffs for Photovoltaics in Germany. Bundesverband Solarwirtschaft.[Saatavilla:http://www.epia.org/uploads/media/080904_B2B1b_GE_Hoffmann.pdf , viitattu: 24.4.2012]

- Börner, J., Burger, K., Zolotarev, P., Lehner, J., 2011, Impact of Large-scale Distributed Generation on Network Stability During Over-Frequency Events & Development of Mitigation Measures. Summary. Ecofys Germany GmbH & Universität Stuttgart (Institute of Combustion and Power Plant Technology). [Saatavilla: http://www.vde.com/en/fnn/Documents/2011-09_Ecofys_IFK_50-2-Hz_Summary.pdf, viitattu 1.12.11]
- CENELEC, 2012, Standards Development, Technical Bodies, CLC/TC 8X, System aspects of electrical energy supply. Work Programme. [Saatavilla:http://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:22:2714930035679325:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1077,25, viitattu: 26.3.2012]
- de Jager, D., Klessmann, C., Stricker, E., Winkel, T., de Visser, E., Koper, M., Ragwitz, M., Held, A., Resch, G., Busch, S., Panzer, C., Gazzo, A., Roulleau, T., Gousseland, P., Henriët, M., Bouillé, A., 2011, Financing Renewable Energy in the European Energy Market. Tutkimusraportti. ECOFYS, Fraunhofer ISI, TU Vienna EEG, Ernst & Young. [Saatavilla: http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/renewables/2011_financing_renewable.pdf, viitattu: 22.1.2012]
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012, Grid integration of generator plants - Low-voltage - Test requirements for generator units to be connected to and operated in parallel with low-voltage distribution networks.[Saatavilla: <http://www.dke.din.de/cmd?projid=146261661&level=tpl-proj-detailansicht&languageid=en&contextid=dke&print=true>, viitattu 14.4.2012]
- Eduskunta, 2011, Hallituksen esitys Eduskunnalle laiksi uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta annetun lain muuttamisesta. [Saatavilla: <http://217.71.145.20/TRIPviewer/show.asp?tunniste=HE+124/2011&base=erhe&palvelin=www.eduskunta.fi&f=WORD>, viitattu 30.11.2011]
- Ehara, T., 2009, Overcoming PV grid issues in urban areas. Technical Report. International energy agency photovoltaic power systems program. Mizuho Information & Research Institute, Inc., Japan. [Saatavilla: http://www.iea-pvps-task10.org/IMG/pdf/rep10_06.pdf, viitattu: 31.3.2012]

- Elinkeinoelämän keskusliitto EK, Energiateollisuus ry, 2011, Arvio Suomen sähkön kysynnästä vuonna 2030. [Saatavilla http://www.energia.fi/sites/default/files/arvio_sahkon_kysynnasta_2030_271009.pdf, viitattu 21.1.2012]
- EMV, 2011, Eurooppalainen sähkömarkkina lähenee. EMV tiedottaa 3/2011. Energiamarkkinaviraston sidosryhmälehti. [Saatavilla http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/EMV%203_11.pdf, viitattu 5.12.2011]
- EMV, 2012, Kalvokuvia sähkön hinnasta 1.1.2012. Tilasto sähkön hinnan kehityksestä. [Saatavilla http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Kalvoja_sahkon_hinnan_kehityksesta_12_01.pdf, viitattu 21.1.2012]
- EN 62116, 2012, Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters. Eurooppalainen standardi. CENELEC.
- Energiateollisuus, 2009, Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Verkostosuositus. [Saatavilla: http://www.roaming.fi/Mikrotuotannon+liitt%C3%A4minen+verkostosuositus_lopullinen.pdf, viitattu 8.11.2011]
- Energiateollisuus, 2010a, Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta 2011. Tutkimusraportti. [Saatavilla: http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Kertomus_sahkon_toimitusvarmuudesta_2011.pdf, viitattu: 21.1.2012]
- Energiateollisuus, 2010b, Sähkön tuotanto, tuonti ja vienti. Tilastojulkaisu. [Saatavilla: <http://www.energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkontuotanto/sahkon-tuotanto-tuonti-ja-vienti>, viitattu: 21.1.2012]
- Energiateollisuus, 2010c, Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Harjoitustyö. [Saatavilla: http://www.energia.fi/sites/default/files/alykkaat_sahkoverkot_2010_diplomityo_anni_sarvaranta.pdf, viitattu 24.11.11]
- Energiateollisuus, 2011a, Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Ohje sähköntuotantolaitoksen verkkoonliittämiseen. [Saatavilla:

http://www.energia.fi/sites/default/files/ohje_tuotannon_liittamisesta_asiakasviestintaan.pdf viitattu: 22.1.2012]

Energiateollisuus, 2011b, Sopimusehdot ja liittymismaksut. Verkkosivu. [Saatavilla: <http://www.energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/sopimusehdot-ja-liittymismaksut>, viitattu 15.12.11]

Energiateollisuus, 2011c, Ohje verkon suunnittelijoille tuotannon liittamisestä. Ohje verkon suunnittelutyötä tekevien tueksi. [Saatavilla: http://www.energia.fi/sites/default/files/ohje_verkon_suunnittelun_tueksi.pdf, viitattu: 17.3.2012]

Energiateollisuus, 2012, Kestävän kehityksen sanastoa. Verkkosivu. [Saatavilla: <http://www.energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/kestavan-kehityksen-sanastoa>, viitattu: 24.12.2012]

ENTSO-E, 2011, ENTSO-E Draft Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators. Draft. Verkkokoodiluonnos. [Saatavilla: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/news/110322_Pilot_Network_Code_Connections.pdf, viitattu 15.12.11]

ENTSO-E, 2012, ENTSO-E Draft Network Code for Requirements for Grid Connection applicable to all Generators. Verkkokoodiluonnos. [Saatavilla: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/consultations/Network_Code_RfG/120124_Network_Code_for_Requirements_forGrid_Connection_applicable_to_all_Generators.pdf, viitattu 28.3.2012]

Erneuerbare Energien Gesetz, 2011, Einspeisevergütung für PV-Anlagen nach dem EEG 2012. Verkkosivu. [Saatavilla: <http://www.eeg-2012.info/eeg-photovoltaik-einspeiseverguetungen-2012.html>, viitattu 29.11.11.]

Euroopan Komissio, 2011, Euroopan Unionin portaali. [Saatavilla: http://ec.europa.eu/climateaction/index_fi.htm, viitattu 11.11.2011]

- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/95/EY tietyllä jännitealueella toimivia sähkölaitteita koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä, 2006. Euroopan unionin virallinen lehti. [Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:374:0010:0019:FI:PDF>, viitattu 14.4.2012]
- Eurosolar, 2012, Aurinkosähköjärjestelmien hinnasto. Aurinkosähkötalon verkkosivu. [Saatavilla: <http://www.eurosolar.fi/hinnasto/?kategoria=17>, viitattu 23.1.2012]
- Eurostat, 2010, Electricity prices for second semester 2009. Tilastojulkaisu. [Saatavilla: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-QA-10-022/EN/KS-QA-10-022-EN.PDF, viitattu: 21.12.2012]
- Farin, J., Peltonen, L., Pykälä M-L., Uski-Joutsenvuo, S., 2009, Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätögeneraattorikäytöissä. Tutkimusraportti. VTT. [Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>, viitattu 17.3.2012]
- Fingrid, 2007, Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset. [Saatavilla: http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/vaatimukset__vju_2007.pdf, viitattu 30.3.2012]
- Finlex, 1397/2010, Valtioneuvoston asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. [Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101397>, viitattu 1.12.11]
- Finnwind, 2012, Aurinkojärjestelmätuotesarjan hinnasto. [Saatavilla: http://www.finnwind.fi/web-content/esitteet/Aurinko_C_sarja_yleisesite_fin.pdf, viitattu: 23.1.2012]
- Green Tech Media, 2011, The Smart Grid in Europe 2012-2016: Technologies, Market Forecasts and Utility Profiles. Tutkimusraportti. [Saatavilla: <http://www.greentechmedia.com/research/report/the-smart-grid-in-europe-2012>, viitattu 21.1.2012]

- Gulich, Oleg., 2010, Technological and business challenges of smart grids, Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/62885/nbnfi-fe201003041461.pdf?sequence=3>, viitattu 8.12.11]
- Held, A., Ragwitz, M., Merkel, E., Rathmann, M., Klessmann, C., 2010, RE-Shaping: Shaping an effective and efficient European renewable energy market. Tutkimusraportti. Fraunhofer ISI, ECOFYS. [Saatavilla: http://www.reshaping-res-policy.eu/downloads/RE-Shaping%20D5D6_Report_final.pdf, viitattu 22.1.2012]
- Huotari, K, Partanen, J., 1998, Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste. LTKK. ISBN 951-764-282-2. [Saatavilla: https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/teollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf, viitattu: 7.4.2012]
- IEA, International Energy Agency, 2010, Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy. Tutkimusraportti. [Saatavilla: http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf, viitattu 29.11.11]
- Ihamäki, J., 2012, Integration of microgrids into electricity distribution networks. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Jääntti, S., 2003, Connection of Distributed Energy Generation Units in the Distribution Network and Grid, CODGUnet. Tutkimusraportti. Oy Merinova Ab, VTT, University of Vaasa, Research Center Technobothnia, SINTEF, Vattenfall Utveckling (VUAB), LTH, Elforsk, Eltra.[Saatavilla: http://merinova.fi/tiedostopankki/GODGUNet_89.pdf,viitattu 3.3.2012]
- Kinttula, M., 2008, Pienvesivoiman elvytys, käyttöönotto ja kannattavuus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/42863/nbnfi-fe200812042231.pdf?sequence=3>, viitattu 29.11.11]
- Kitunen, J., 2007, Aurinkosähkön soveltuvuus hajautettuun energiantuotantoon Suomessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. [Saatavilla: https://webhotel2.tut.fi/units/smg/tp/kurssit/SMG-4300/luennot/dt_aurinkos_web.pdf , viitattu: 17.3.2012]

- Kivistö, A., Vakkilainen, E., 2011, Uusiutuvan sähkön lisäämiseen käytettyjen energiaverojen vaikutus kuluttajan maksamaan sähkön hintaan. Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://www.tek.fi/ci/pdf/teknologia/TEK_LUTraporttiFINAL.pdf, viitattu 21.2.2012]
- Koreneff, G., 2010, Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa, Tutkimusraportti. VTT. [Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/ muut/2010/VTT-R-07496-10.pdf>, viitattu 5.12.11]
- Kotovuori, T., 2010, Esityksien ja yleisötapahuumien tilapäinen pienjänniteverkko. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Kotovuori_Tuomas_julk.pdf, viitattu: 15.12.11]
- Kuisma, P., Kurtakko, J., 2008, Esiselvitys hajautetun pienimuotoisen sähköntuotannon liiketoiminnallisista toimintaedellytyksistä Lapissa. Osaraportti. Lapin yliopisto. [Saatavilla: http://www3.lappia.fi/AO/tiedostot/luontoala/bioenergiahanke/projektin_raportit/hajautettu_sahkontuotanto.pdf, viitattu 17.3.2012]
- Kumpulainen, L., Ristolainen, I., 2006, Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen. Projektiraportti. VTT. [Saatavilla: http://www.merinoval.fi/tiedostopankki/Suojaus_Loppuraportti_87.pdf, viitattu: 5.11.2011]
- Lakervi, E., Partanen, J., 2008, Sähkönjakeluteknikka. Helsinki University Press. ISBN: 978-951-672-357-3.
- Lehto, I., 2009, Mikroituotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. TKK. [Saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100081.pdf>, viitattu: 6.11.2011]
- Lemström, B., 2006, Pienimuotoisen tuotannon verkkoon pääsyn edistäminen, Tutkimusraportti. VTT. [Saatavilla: http://www.tem.fi/files/16210/VTT-R-02857-06_Pientuotannon_verkkoonpaasyn_edistaminen.pdf, viitattu 17.3.2012]

- Lopes, J.A.P., Moreira, C.L., Madureira, A.G., Defining control strategies for MicroGrids islanded operation. Power Systems, IEEE Transactions on , vol.21, no.2, pp. 916- 924, May 2006. [Saatavilla: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1626398&isnumber=34141>, viitattu: 21.12.11]
- Löf, N., 2009, Pienjänniteverkon automaattoratkaisuiden kehitysnäkymät. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Lof_Niklas_julk.pdf, viitattu: 2.1.2012]
- Marja-Aho, L., 2011, Uusiutuvan energian tuet EU-maissa, selvitys uusiutuvan energian tukimalleista sähkön ja lämmön tuotannossa EU-maissa. Erikoistyö. Aalto-yliopisto. Energiateollisuus. [Saatavilla: http://www.energia.fi/sites/default/files/energiateollisuus_raportti_28_9_2011_2.pdf , viitattu 20.3.2012]
- Motiva, 2010, Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. Loppuraportti.[Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/4458/Hajautettu_ja_paikallinen_energiantuotanto_loppuraportti.pdf, viitattu 22.11.11]
- Mulder, R. 2011, Thinfilm PV: Cost Reduction and Market Development. Presentation. Climate Parliament Forum. First Solar. [Saatavilla: <http://climateparl.net/cpcontent/ppt/presen%204%20110524%20Lettemike%20Mulder%20Climate%20Parliament%20Forum.ppt>, viitattu: 29.11.2011]
- Mäki, K., 2007, Novel Methods for Assessing the Protection Impacts of Distributed Generation in Distribution Network Planning. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://webhotel2.tut.fi/units/set/raportteja/dg/yleiset/thesis_net.pdf, viitattu: 18.12.11]
- Nasr, E., 2011, Solar Integration Technology. Presentation. SMA. UWIG, Kansas City, MO. [Saatavilla: http://www.nrel.gov/eis/pdfs/uwig_spring_2011_nasr.pdf, viitattu: 26.1.2012]

- Nord Pool Spot, 2011. Elspot-hinnat. [Saatavilla: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/>, viitattu: 29.12.11]
- Observ'ER, 2011, The state of renewable energies in europe, 11th EurObserv'ER Report. Eur'Observ'ER. Raportti. [Saatavilla: <http://www.eurobserv-er.org/pdf/barobilan11.pdf>, viitattu 6.2.2012]
- Oulun Energia, 2011, Generaattoreiden liittäminen Oulun Energia Siirto ja Jakelu Oy:n sähkönjakeluverkkoon. Ohjekansio. [Saatavilla: www.ouluenergia.fi/file.php?fid=860, viitattu: 17.3.2012]
- Partanen, J., Honkapuro, S., Lassila, J., Kaipia, T., Verho, P., Järventausta, P., Strandén, J., Mäkinen, A., 2010, Sähkönjakelun toimitusvarmuuden kriteeristö ja tavoitetasot. Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://www.energia.fi/sites/default/files/sahkon_toimitusvarmuuskriteeristo_2010_loppuraportti.pdf, viitattu 14.12.11]
- Partanen J., 2010, INCA-rajapinnan konsepti ja demonstraatio. INCA-projektin loppuseminaari. LUT, TUT, VTT. [Saatavilla: http://hermia-fi-bin.directo.fi/@Bin/70a6f2213d4503eed48094c7f5506bc3/1323089252/application/pdf/748423/Partanen_INCA-concept-14.10.2010.pdf, viitattu 5.12.11]
- Peltoniemi, P., 2005. Vektorimodulointimenetelmien ja verkkosuotimien vertailu jännitevälipiiriverkkovaihtosuuntaajassa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricaldrives/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/Pasi_Peltoniemi.pdf, viitattu 21.12.11]
- Pienvesivoimayhdistys ry, 2009, Pienvesivoimalaopas. Opas pienvesivoiman käyttöönottoon. Pienvesivoimayhdistys ry. PR Vesisuunnittelu Oy. [Saatavilla:<http://server.perlasoft.fi/vesivoima/images/Pienvesivoimaopas.pdf>, viitattu 23.3.2012]
- PR Vesisuunnittelu Oy, 2005, Pienvesivoimakartoitus minivesivoimasektori < 1MW, Kauppa- ja teollisuusministeriölle tehty selvitys KTM Dnro 58/804/2004. [Saatavilla: <http://www.motiva.fi>

/files/701/pienvesivoimakarttoitus.pdf, viitattu 29.11.11]

Projectgroep testveld kleine windturbines (kwt) Zeeland, 2009, Testveld Kleine WindTurbines Zeeland. Testiraportti. Delta, Zeuwind, Provincie Zeeland, Gemeente Sluis, Greenlab. [Saatavilla: http://kreeft.zeeland.nl/zeesterdoc/ZBI-O/ZEE/ZEE0/8012/801257_1.pdf, viitattu 17.3.2012]

Pyrhönen, J., Missaghi, K., 1983, Symmetriset komponentit ja niiden käyttö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. ISBN: 951-763-256-8. [Saatavilla: https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0600/materiaali/symmetriset_komponentit_ja_niiden_kaytto_2.pdf, viitattu 7.4.2012]

Pöyry Energy Oy, 2006, Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon. Helsinki. [Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/232/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf, viitattu 14.12.11]

Ranade, S.J., Sagi, D.R., Mulpuri, R., Surabhi, R., Mitra, J., 2007, Likelihood of Islanding in Distribution Feeders with Photovoltaic Generation. Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE , vol., no., pp.1-6, 24-28 June 2007. [Saatavilla: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4276004&isnumber=4275199> , viitattu 21.3.2012]

Rautiainen, A., 2008, Virtuaalivoimalan tarjoamat lisäpalvelut sähköverkon häiriötilanteiden hallintaan. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://webhotel2.tut.fi/units/set/raportteja/dg/eldig2_vpp/Antti_Rautiainen_Diplomityo_LOPULLINEN.pdf , viitattu 21.11.2011]

SFS-EN 50160 , 2010 , Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry.

SFS-EN 50438, 2008, Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry.

SFS-EN 62116, 2011, Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry.

- SFS-EN 62446, 2010, Sähköverkkoon kytketyt valosähköiset järjestelmät. Minimivaatimukset järjestelmän dokumentaatiolle, käyttöönototesteille ja tarkastuksille. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry.
- SFS 6000, 2007, Pienjännitesähköasennukset. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry.
- SFS 6002, 2005, Sähkötyöturvallisuus. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry.
- Sener, 2001, Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon. [Saatavilla: <http://www.energia.fi/sites/default/files/10930.pdf>, viitattu 20.12.11]
- Sikanen, H., Rissanen, R., Rouvali, J., 2006, Paikallissähkö, Maaseudun paikallinen sähkönjakelu ja sähkönkäyttäjärjestelmä, verkkoonliittymistekniikan kehittäminen. Projektiraportti. Savonia. [Saatavilla: http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/_tki-ja-palvelut/julkaisutoiminta/pdf/paikallissahko.pdf, viitattu 17.3.2012]
- Solarshop, 2012, Aurinkosähkö/Täydelliset järjestelmät/ -hinnasto. [Saatavilla: <http://www.solarpower.fi/Hinnasto.php>, viitattu 23.1.2012]
- Steinhilber, S., Ragwitz, M., Rathmann, M., Klessmann, C., Noothout, P., 2011, RE-Shaping: Shaping an effective and efficient European renewable energy market. Tutkimusraportti. Fraunhofer ISI, ECOFYS. [Saatavilla: http://www.reshaping-res-policy.eu/downloads/RE-Shaping%20D17_Report_update%202011_final.pdf, viitattu 6.2.2012]
- Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Motiva, Darrox Oy, Eagle Windpower Oy, Finnwind Oy, Mypower Finland Oy, Posira Oy, 2010, Opas pientuulivoimalan hankkijalle. [Saatavilla: http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoimayhd-files/Pientuuliopas_A3_2402.pdf, viitattu 25.11.11]
- Suomen tuulivoimayhdistys ry, Vuola, L., 2012. Epäselvä lainsäädäntö ja viranomaisten kirjavat tulkinnat vaikeuttavat pientuulivoiman rakentamista. Ongelma tiivistyy ristiriitaiseen lupakäytäntöön.

Lehdistötiedote. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Asianajotoimisto Borenius Oy. [Saatavilla: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tiedotteet>, viitattu 23.3.2012]

Sähkömarkkinalaki (386/1995) [Saatavilla:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1995/19950386>, viitattu 7.11.2011]

TEM, 2011, Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti. Kansallinen toimintasuunnitelma. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Saatavilla: http://www.tem.fi/files/29773/Suomen_kansallinen_toimintasuunnitelma.pdf, viitattu: 28.3.2012]

TEM, 2012a, Ohjeelliset tukiprosentit hyväksyttävistä kustannuksista vuodelle 2012. [Saatavilla: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=3093>, viitattu 18.3.2012]

TEM, 2012b, EU:n tuotedirektiivien ja kansallisen tuotelainsäädännön uudistaminen. [Saatavilla: <http://www.tem.fi/tuotedirektiivit>, viitattu: 14.4.2012]

Timonen, J., Kangasharju, S., von Hertzen, M., 2008, Energiantuotannon hajautus ja hallinta. DENSY-teknologiaohjelman loppuarviointi. Tekes. [Saatavilla: http://www.tekes.fi/fi/document/42939/densy_arviointiraportti_pdf, viitattu: 21.1.2012]

trend:research GmbH, 2011, Genossenschaftliche Unterstützungsstrukturen für eine sozialräumliche Energiewirtschaft. Teilprojekt: Marktakteure Erneuerbare-Energien-Anlagen. KNI Klaus Novy iNSTiTUT. Berlin/Köln/Bremen [Saatavilla: http://www.kni.de/media/pdf/Ergebnispraesentation_Marktanteile_EE_Werkstattgesprach_061011.pdf, viitattu 16.12.11]

TST Photovoltaic Shop, 2012. Aurinkosähköjärjestelmien verkkokauppa. [Saatavilla: <http://www.photovoltaiik-shop.com>, viitattu 17.3.2012]

- Tukes, 2012, Pienjännitedirektiivi. Verkkosivu. [Saatavilla: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Pienjannitedirektiivi--/>, viitattu 14.4.2012]
- Vainikka, J-P, 2011, Hajautetun tuotannon verkkoonliittäminen - verkkokoodit ja käytännön toimet. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/72552/nbnfi-fe201111225846.pdf?sequence=3>, viitattu: 19.12.11]
- Valkonen, J., Tommila, T., Jaakkola, L., Wahlström, B., Koponen, P., Kärkkäinen, S., Kumpulainen, L., Saari, P., Keskinen, S., Saaristo, H., Lehtonen, M., 2005, Paikallisten energiareurssien hallinta hajautetussa energijärjestelmässä. VTT TIEDOTTEITA 2284, Espoo. [Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2284.pdf>, viitattu 29.11.11]
- Valtonen, P., 2009, Interaktiivisen asiakasrajapinnan mahdollistamat energiatehokkuutta tukevat toiminnot ja niiden kannattavuus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/46890/nbnfi-fe200908242051.pdf?sequence=3>, viitattu 7.11.2011]
- Valtonen, P., Honkapuro, S., Partanen, J., 2010, Interaktiivisen asiakasrajapinnan mahdollistamat palvelutoiminnot, Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://webhotel2.tut.fi/units/set/research/inca-Public/tiedostot/Raportit/INCA_Yhteeveto_rajapintavaatimuksista.pdf, viitattu 21.11.2011]
- Vartiainen, E., Luoma, P., Hiltunen, J., Vanhanen, J., 2002, Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO2-päästöt, Tutkimusraportti. [Saatavilla: http://www.gaia.fi/files/106/Hajautettu_energiantuotanto_loppuraportti.pdf, viitattu 11.11.2011]
- VDE V 0126-1-1, 2006, Selbstätige Schaltstelle zwischen einer netzparallelen Eigenerzeugungsanlage. Saksalainen standardi DIN VDE 0126-1-1.
- VDE-AR-N 4105, 2011, Power generation systems connected to the low-voltage distribution network. Technical minimum requirements for the

connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks. FNN. Saksalainen standardi VDE-AR-N 4105.

VDE, 2012, The 50.2 Hz problem, Controlling active power in the event of overfrequency in generators connected to the low-voltage distribution network. [Saatavilla: <http://www.vde.com/en/fnn/pages/50-2-hz.aspx>, viitattu: 14.4.2012]

Verhoeven, B., 2002, Probability of islanding in utility networks due to grid connected photovoltaic power systems. Report IEA PVPS T5-07:2002. International Energy Agency. [Saatavilla: http://www.hme.ca/gridconnect/IEA_PVPS_Task_5-07_Probability_of_Islanding_due_to_PVPS.pdf, viitattu 21.3.2012]

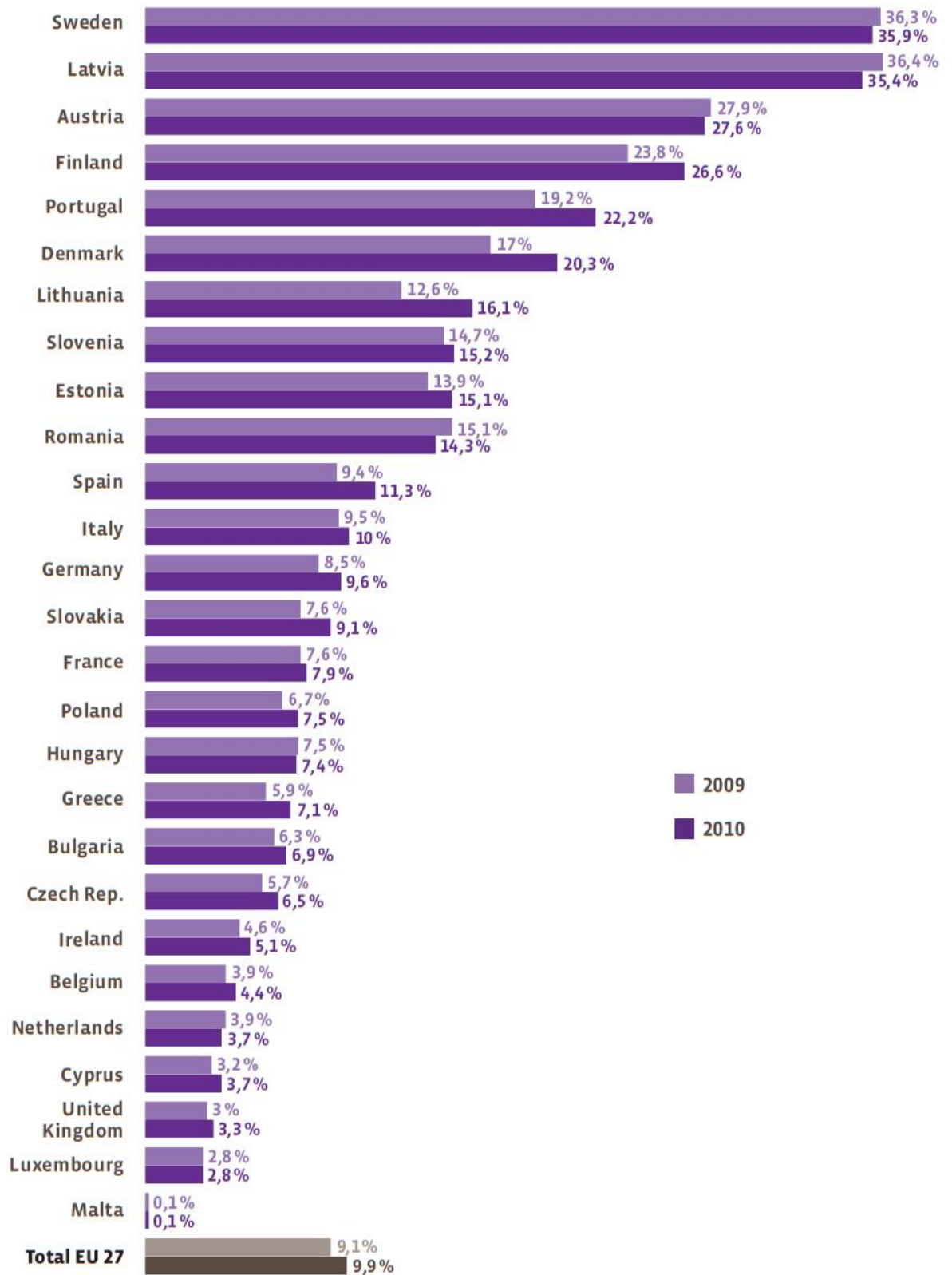
Viljainen, S. 2001, Sähkön laadun seurantamittausten nykytila Suomessa ja erään mittalaitteen soveltuvuus sähkön laadun mittaamiseen. Diplomityö. Lappeenranta teknillinen yliopisto. [Saatavilla: http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricitymarkets/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/dtyo_viljainen.pdf, viitattu 14.12.2011]

Viola Systems, Case Vattenfall: Automating the distribution network. [Saatavilla: <http://violasystemscom.adv3.nebula.fi/sites/default/files/Vattenfall%20case.pdf>, viitattu: 26.3.2012]

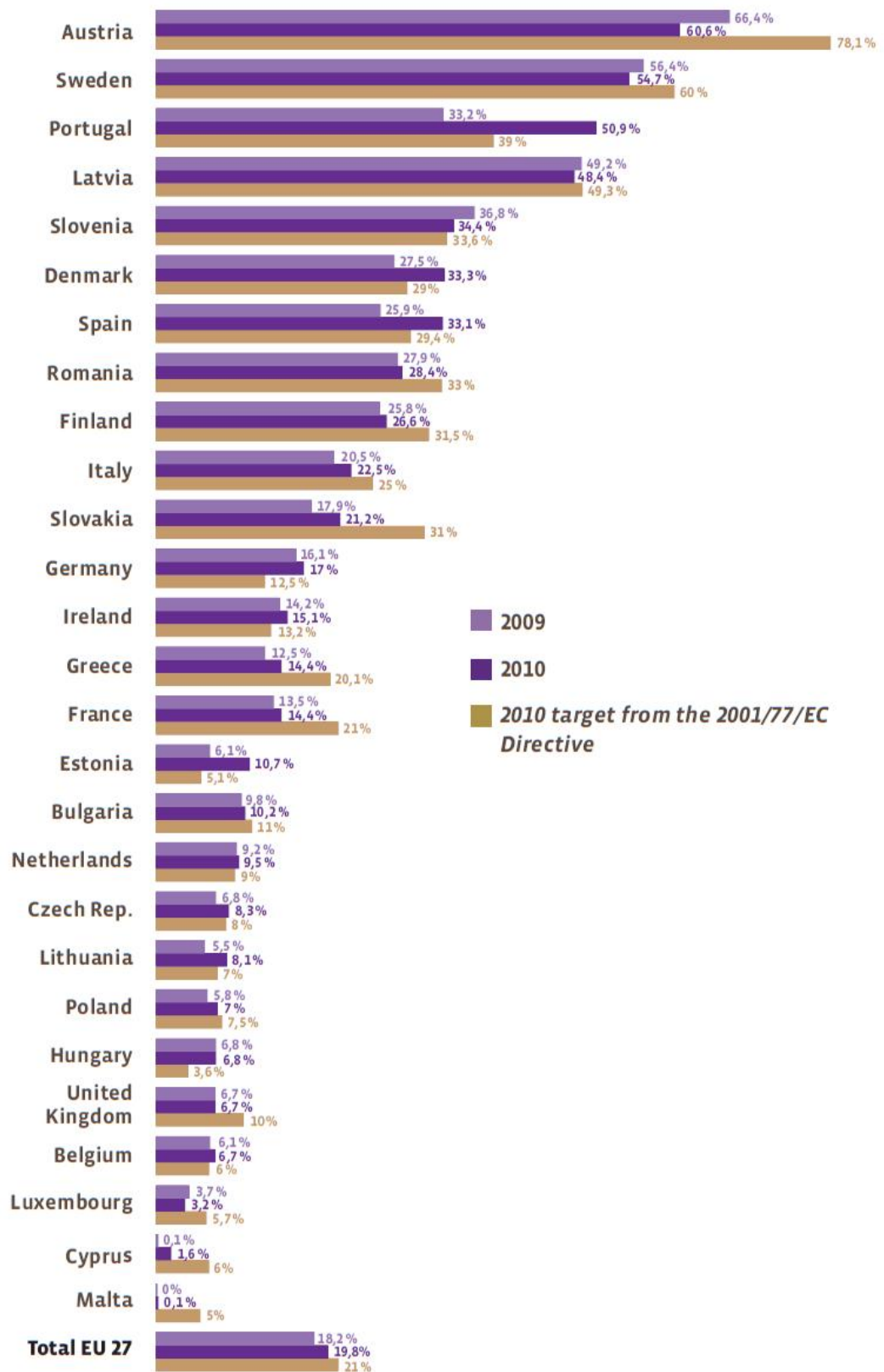
Wacker Polysilicon, 2010, Supplying a growing industry. Wacker Chemie Investor Relations. PVSEC Valencia 2010. [Saatavilla: http://www.wacker.com/cms/media/documents/investor-relations/pvsec_wacker_0910.pdf, viitattu: 10.4.2012]

Wolff, J., Ranta, T., 2008, Hajautettu vai keskitetty energiantuotanto? Esitelmä. Kuntien 4. ilmastokonferenssi, Tampere. [Saatavilla: <http://hankinnat.fi/binary.asp?path=1;29;356;1033;36692;166238;126636;138074;138080;138082&field=FileAttachment&version=1>, viitattu 30.11.11]

UUSIUTUVIEN ENERGIALÄHTEIDEN (RES) KÄYTTÖ EUROOPASSA

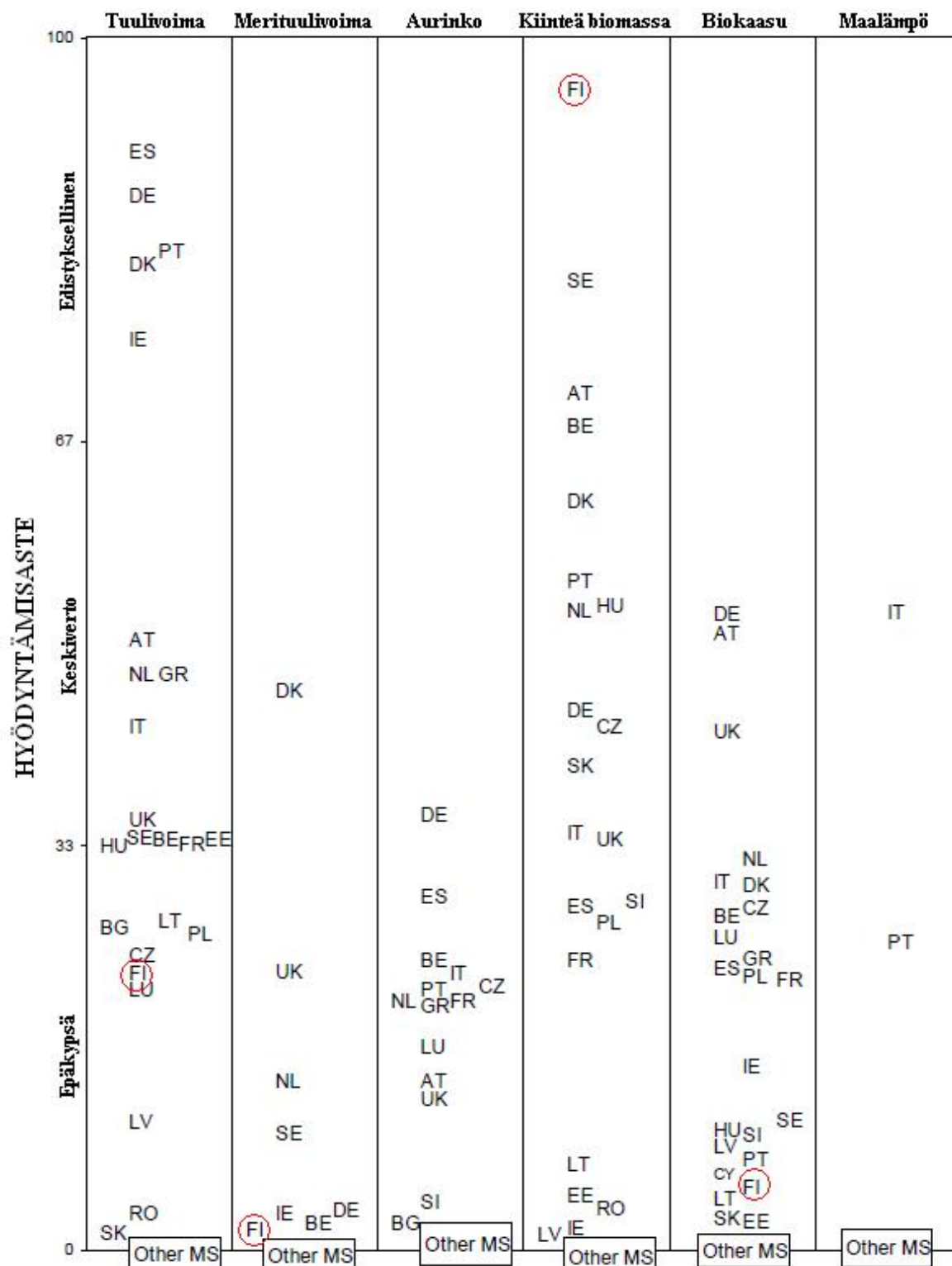


Kuva. Uusiutuvien energialähteiden osuus kokonaisenergiankulutuksesta prosentteina EU-maissa 2009 ja 2010. (Muokattu lähteestä: Observ'ER 2011)



Kuva. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön osuus sähkön kokonaiskulutuksesta EU-maissa vuonna 2009 ja 2010 sekä tavoite vuodelle 2010. (Muokattu lähteestä: Observ'ER 2011)

RES-E HYÖDYNTÄMISASTE EU-MAISSA VUONNA 2008



Kuva. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön hyödyntämisaste tuotantomuodoittain EU-27 maissa vuonna 2008 (vesi- ja tuulisähkö 2009). (Muokattu lähteestä: Steinhilber et al. 2011)

SFS EN-50160 KOOSTE

Alla olevassa taulukossa on kooste Senerin vuonna 1996 määrittelemistä ja vuonna 2001 päivittämistä laatutekijöiden hyvistä ja normaaleista arvoista sekä standardin SFS-EN 50160:n mukaiset laatuarvot (Kotovuori 2010).

Taulukko. Sähkön laatu. (Kotovuori 2010)

	Korkea laatu	Normaali laatu	SFS-EN 50160:n mukainen laatu	Huomaus
Taajuus	50 Hz ± 0,5 %	50 Hz ± 1 %	99,5 % vuodesta 50 Hz ± 1 %, 100 % ajasta 50 Hz +4 % / -6 %	Mittaus 10s jaksoina
Jännitteen vaihtelu	100 % ajasta 225-235 V	100 % ajasta 207- 244 V	95 % $U_N \pm 10$ %, 100% ajasta $U_N +10\%$ / -15 %	Mittaus tehollisarvojen 10 min keskiarvoina viikon ajan
Nopeat jännite-muutokset	$P_{ST} \leq 1$ ja $P_{LT} \leq 0,8$	$P_{LT} \leq 1$	95 % P_{LT} - arvoista ≤ 1	
Harmoniset yliaallot	THD ≤ 3 %	THD ≤ 6 %	95 % ajasta THD ≤ 8 %	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan
Epä-symmetria	$U_{SH} \leq 1$ %	$U_{SH} \leq 1,5$ %	95 % $U_{SH} \leq 2$ %	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan

Lyhytaikainen häiritsevyysindeksi P_{ST} saadaan mittaamalla kymmenen minuutin ajalta. Pitkäaikainen häiritsevyysindeksi lasketaan yhtälön

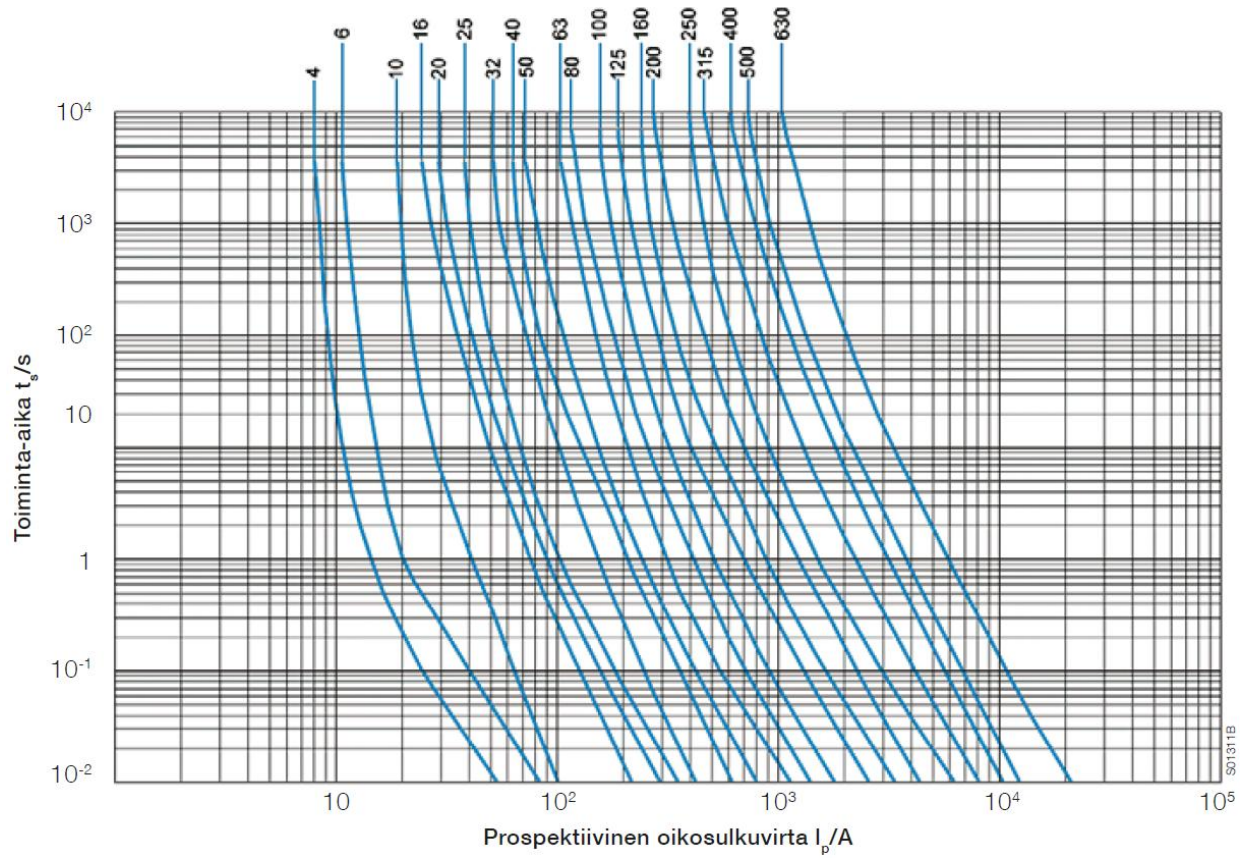
$$P_{LT} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

avulla. Harmoniset yliaallot (THD) lasketaan seuraavasti

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2},$$

missä h on harmonisen järjestysluku. Jakelujännitteen epäsymmetriasta U_{SH} sanotaan seuraavasti: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen, jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista.” (SFS-EN 50160).

KAHVASULAKKEIDEN SULAMISKÄYRÄSTÖ



Kuva. Kahvasulakkeiden sulamiskäyrästä (ABB 2012)

MUUNTOPIIRIN LASKENTALISTAUS

MUUNTOPIIRIN LASKENTATULOKSET - LTY
 MUUNTOPIIRI: XXXX -----

VUOSIENERGIAT (KWH) JA ASIAKASMÄÄRÄT

Ryhmä	Energia	Lukumäärä
1	4397.0	2
5	6927.0	1
6	13005.0	1
Yhteensä	24329.0	4

Laskentajännite: 405 V

MUUNTOPIIRIN HÄVIÖT:	Tehohäviöt (kW)	Energiahäviöt (kWh)
Muuntaja/kuormitus	0.1	157
Muuntaja/tyhjäk.	0.1	1183
Pienjänniteverkko	0.0	97
Yhteensä	0.3	1436

MUUNTAJA/MUUNTAJAT

Muuntajakoko (kVA)	Huippukuorma (kW)	Jännitt.al. (%)	Jännite (V)
30	8.0	1.1	400

MUUNTAJA --> PJ-KESKUS

Johdinlaji	Kuormitus (kW)	Kuormitus/kuormitettavuus (%)
KISKO	8.0	2

PIENJÄNNITEVERKKO LÄHDÖITTÄIN JA JOHTO-OSITTAIN

TULOSTUSSARAKKEET

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
463939890666R1	1	KESK.SULAKE	0	1 KISKO	3.4	1	0.0	0.0	1.1	400.3
463939890665W1	1	463939791679I1	99	100 RA35	3.4	5	0.8	0.2	1.3	399.6
463939791679I1		51920100	75	175 MA35	3.4	5	1.4	0.1	1.4	399.0
463939890666R1	2	KESK.SULAKE	0	1 KISKO	5.7	1	0.0	0.0	1.1	400.3
463939891665W1	2	46393990676X1	101	102 RA35	5.7	8	1.4	0.3	1.4	399.0
463939990676X1		51920400	133	235 RA35	0.7	1	0.1	0.0	1.5	398.8
463939990676X1		463939989581X1	95	197 RA35	5.3	7	1.3	0.3	1.7	397.9
463939989581X1		51920300	17	214 RA25Y	1.9	10	0.6	0.1	1.9	397.3
463939989581X1		51920200	340	537 RA35	4.7	7	1.2	0.8	2.5	394.7

JOHTOMÄÄRÄT

MA35	75 m
RA25Y	17 m
RA35	768 m
Yhteensä	860 m

MUUNTOPIIRIN SUOJAUSTARKASTELU

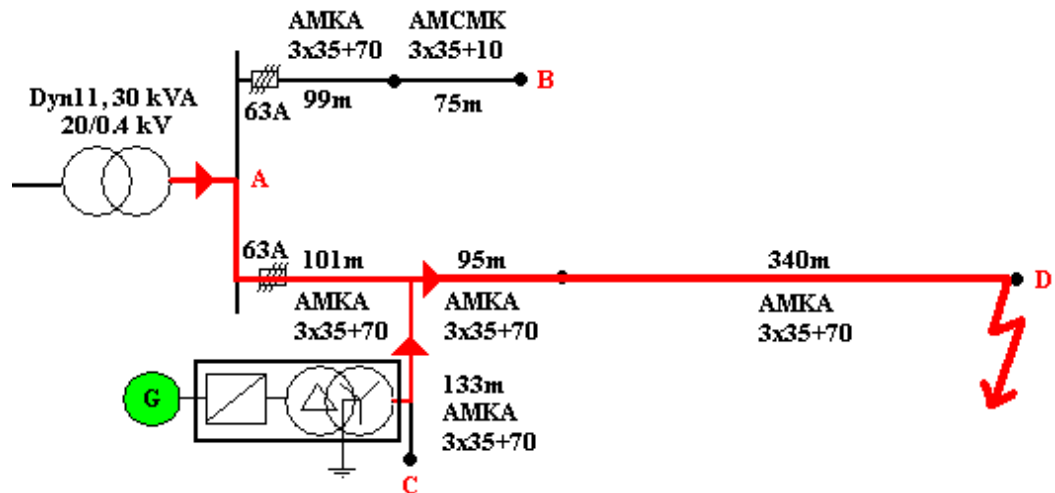
PIENJÄNNITEVERKKO LÄHDÖITTÄIN JA JOHTO-OSITTAIN

TULOSTUSSARAKKEET

1	2	3	4	5	6	7	8	9
463939890666R1	1	KESK.SULAKE KISKO	5.5	987	0.0	0.0	0.0	
463939890665W1	1	463939791679I1 RA35	5.5	609	63.0	9.7	25.0	
463939791679I1		51920100 MA35	5.5	394	63.0	6.3	25.0	
463939890666R1	2	KESK.SULAKE KISKO	9.1	987	0.0	0.0	0.0	
463939891665W1	2	46393990676X1 RA35	9.1	604	63.0	9.6	63.0	
463939990676X1		51920400 RA35	1.1	390	63.0	6.2	25.0	
463939990676X1		463939989581X1 RA35	8.5	435	63.0	6.9	50.0	
463939989581X1		51920300 RA25Y	9.3	406	63.0	6.5	25.0	
463939989581X1		51920200 RA35	7.6	213	63.0	3.4	25.0	

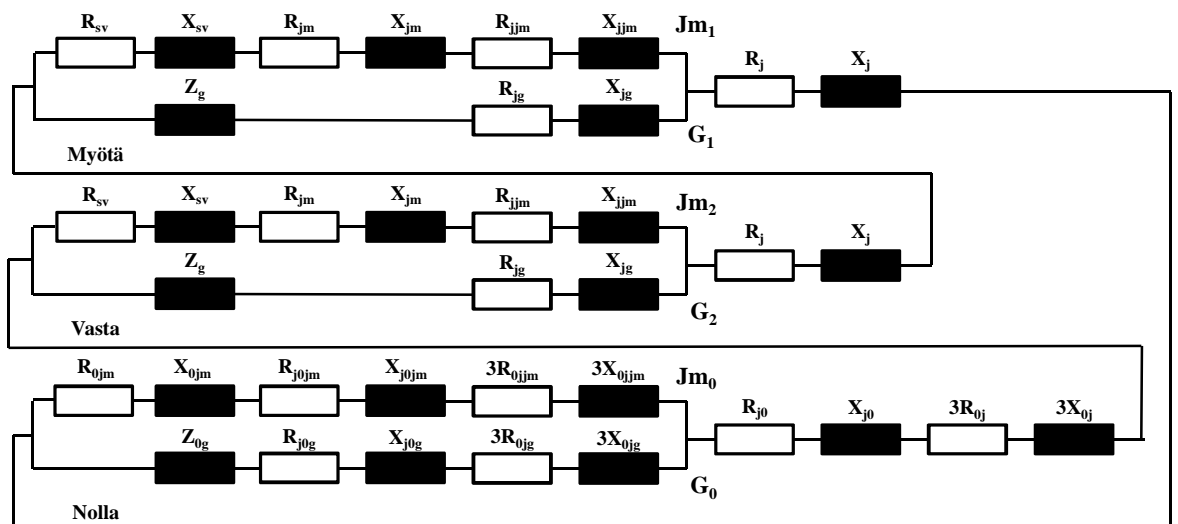
Laskentalistauksessa esiintyvä yksivaiheinen liittymä on tarkoituksella jätetty pois tarkasteluista, ts. sitä ei ole huomioitu missään muussa yhteydessä.

LASKENTAESIMERKKI PIENIMMÄSTÄ 1V-OIKOSULKUVIRRASTA



Kuva. Tuotantolaitos (G) syöttää vikavirtaa lähdölle sivusta ja pienentää näin ollen sulakkeen näkemää vikavirtaa. Erotusmuuntajan arvoina on käytetty vastaavankokoisen jakelumuuntajan arvoja.

Yksivaiheinen maasulku on epäsymmetrinen poikittaisvika, laskennan yksinkertaistamiseksi käytetään symmetrisiä komponentteja, ts. jaetaan verkko myötä-, vasta- ja nollaverkkoihin (Pyrhönen & Missaghi 1983). Komponenttiverkko on alla olevassa kuvassa.



Kuva. Komponenttiverkon kytketyminen esimerkkiverkon 1v-oikosulkussa.

Komponenttiverkossa esiintyvät muuttujat on selitetty alla olevassa listauksessa.

$Z_{sv} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{ksv}} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2$	Syöttävän verkon impedanssi
$X_{sv} = 0,995 \cdot Z_{sv} \cdot i$	Syöttävän verkon reaktanssi (Huotari&Partanen 1998)
$R_{sv} = 0,1 \cdot X_{sv}$	Syöttävän verkon resistanssi (Huotari&Partanen 1998)
$r_k = \frac{P_k}{S_n}$	Jakelumuuntajan oikosulkuresistanssi
$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$	Jakelumuuntajan oikosulkureaktanssi
$R_{jm} = r_k \cdot \frac{U_2^2}{S_n}$	Jakelumuuntajan resistanssi
$X_{jm} = x_k \cdot \frac{U_2^2}{S_n} \cdot i$	Jakelumuuntajan reaktanssi
$R_{jjm} = l_{jjm} \cdot r_j$	Jakelumuuntajahaaran johdon resistanssi
$X_{jjm} = l_{jjm} \cdot x_j \cdot i$	Jakelumuuntajahaaran johdon reaktanssi
$Z_g = \frac{3 \cdot U_v^2}{S_{ng} \cdot i_{subde}} \cdot i$	Tuotantolaitoksen impedanssi
$R_{jg} = l_{jg} \cdot r_j$	Tuotantolaitoshaaran johdon resistanssi
$X_{jg} = l_{jg} \cdot x_j \cdot i$	Tuotantolaitoshaaran johdon reaktanssi
$R_j = l_j \cdot r_j$	Yhteisen johto-osuuden resistanssi
$X_j = l_j \cdot x_j \cdot i$	Yhteisen johto-osuuden reaktanssi
$R_{0jm} = R_{jm}$	Jakelumuuntajan nolaresistanssi (ABB TTT)
$X_{0jm} = X_{jm}$	Jakelumuuntajan nolareaktanssi (ABB TTT)
$R_{j0jm} = l_{jjm} \cdot r_{j0}$	Jakelumuuntajahaaran vaihejoht. nolaresistanssi
$X_{j0jm} = l_{jjm} \cdot x_{j0} \cdot i$	Jakelumuuntajahaaran vaihejoht. nolareaktanssi
$R_{0jjm} = l_{jjm} \cdot r_{0j}$	Jakelumuuntajahaaran nolajohtimen resistanssi
$X_{0jjm} = l_{jjm} \cdot x_{0j} \cdot i$	Jakelumuuntajahaaran nolajohtimen reaktanssi
$Z_{0g} = R_{0jm} + X_{0jm}$	Tuotantolaitoksen nolaimpedanssi

$$R_{j0g} = l_{jg} \cdot r_{j0}$$

$$X_{j0g} = l_{jg} \cdot x_{j0} \cdot i$$

$$R_{0jg} = l_{jg} \cdot r_{0j}$$

$$X_{0jg} = l_{jg} \cdot x_{0j} \cdot i$$

$$R_{j0} = l_j \cdot r_{j0}$$

$$X_{j0} = l_j \cdot x_{j0} \cdot i$$

$$R_{0j} = l_j \cdot r_{0j}$$

$$X_{0j} = l_j \cdot x_{0j} \cdot i$$

Tuotantolaitoshaaran vaihejoht. nolaresistanssi

Tuotantolaitoshaaran vaihejoht. nolareaktanssi

Tuotantolaitoshaaran nolajohtimen resistanssi

Tuotantolaitoshaaran nolajohtimen reaktanssi

Yhteisen johto-osuuden vaihejoht. nolaresistanssi

Yhteisen johto-osuuden vaihejoht. nolareaktanssi

Yhteisen johto-osuuden nolajohtimen resistanssi

Yhteisen johto-osuuden nolajohtimen reaktanssi

Verkkotietojärjestelmästä saadut parametritiedot on koottu alla olevaan kuvaan.

The image shows a software interface for configuring electrical components. It is divided into three main sections:

- PJ-Johdinlaji (Cable Type) - MA35:**
 - Tunnus: MA35
 - Tyyppi: UNDERGROUND
 - Terminen kuormitettavuus (A): 110
 - Vaihejohtimen resis. (ohm./km): 0.939
 - Nollajohtimen resis. (ohm./km): 2.051
 - Vaihejoht. myötäreakt. (ohm./km): 0.077
 - Vaihejoht. nolareakt. (ohm./km): 0.077
 - Nollajohtimen reaktanssi (ohm./km): 0
 - Vaihelukumäärä: 3
- PJ-Johdinlaji (Cable Type) - RA35:**
 - Tunnus: RA35
 - Tyyppi: OVERHEAD
 - Terminen kuormitettavuus (A): 115
 - Vaihejohtimen resis. (ohm./km): 0.938
 - Nollajohtimen resis. (ohm./km): 0.746
 - Vaihejoht. myötäreakt. (ohm./km): 0.104
 - Vaihejoht. nolareakt. (ohm./km): 0.045
 - Nollajohtimen reaktanssi (ohm./km): 0.073
 - Vaihelukumäärä: 3
- Muuntaja (Transformer):**
 - Tunnus: (empty)
 - Sijointipaikka: (empty)
 - Valmistaja: STRÖMBERG
 - Tyyppi: KTMU-24XA1810
 - Valm vuosi: 1975
 - Kiinnitys: (empty)
 - Kytkenäryhmä: Dyn11
 - Väliottokytkimen portaiden lkm.: 5
 - Väliottokytkimen porras (%): 2.5
 - Paino (kg): 330
 - Sn1 (kVA): 30
 - Sn2 (kVA): (empty)
 - Sn3 (kVA): (empty)
 - Pk (W): 900
 - Po (W): 135
 - U1 (V): 20000
 - U2 (V): 400
 - U3 (V): (empty)
 - Uk (%): 4
 - Io (A): 2.5

Kuva. Kuvakaappaukset muuntaja- ja johtoparametreista. Vasemmassa yläkulmassa on maakaapelin parametrit, oikeassa yläkulmassa AMKA:n parametrit ja oikeassa alalaidassa muuntajan muut parametrit. Vasemmassa reunassa on lisäksi tieto syöttävän verkon oikosulkuvirrasta.

Komponenttiverkossa esiintyvien ja laskennassa käytettävien muuttujien arvot on koottu alla olevaan taulukkoon.

Taulukko. Laskennassa käytettyjen parametrien arvot.

Parametri	Arvo
U_2	20 kV
I_{ksv}	274 A
P_k	900 W
S_n	30 kVA
z_k	4%
U_1	405 V
$l_{j\text{jm}}$	101 m
r_j	0,938 Ω/km
x_j	0,104 Ω/km
U_v	230 V
S_{ng}	Riippuu tapauksesta
i_{suhde}	1,2 *
l_{jg}	133 m
l_j	435 m
r_{j0}	0,938 Ω/km **
x_{j0}	0,045 Ω/km
r_{0j}	0,746 Ω/km
x_{0j}	0,073 Ω/km

* Oletetaan, että VVS:n kyky syöttää vikavirtaa $1,2 \times I_n$.

** Oletetaan, että vaihejohtimen nolaresistanssi sama kuin myötäresistanssi

Tuotantolaitoksen nolaimpedanssina on käytetty vastaavankokoisen jakelumuuntajan nolaresistanssia ja nolareaktanssia. Jakelumuuntaja (J_m) ja tuotantolaitos (Gen) syöttävät vikavirtaa rinnan, jolloin myös impedanssit voidaan laskea näiden rinnankytkentänä. Muiden yksivaiheisten vikojen laskenta kyseisessä verkossa etenisi samalla tavalla. Riippuen tapauksesta, muuttuvat jakelumuuntajan johto-osuus, tuotantolaitoksen johto-osuus, sekä yhteinen johto-osuus.

Myötä ja vastaverkon osat saadaan sarjaankytkennästä seuraavasti

$$J_m = R_{sv} + X_{sv} + R_{jm} + X_{jm} + R_{jmm} + X_{jmm}$$

$$Gen = Z_g + R_{jg} + X_{jg}$$

$$Runko = R_j + X_j$$

Nollaverkon osat saadaan vastaavasti

$$J_{m_0} = R_{0jm} + X_{0jm} + R_{j0jm} + X_{j0jm} + 3R_{0jmm} + 3X_{0jmm}$$

$$Gen_0 = Z_{0g} + R_{j0g} + X_{j0g} + 3R_{0jg} + 3X_{0jg}$$

$$Runko_0 = R_{j0} + X_{j0} + 3R_{0j} + 3X_{0j}$$

Myötä- ja vastaverkon impedanssit saadaan muuntaja- ja generaattorihaarojen rinnankytkennästä

$$Z_1 = Z_2 = \frac{J_m \cdot Gen}{J_m + Gen} + Runko$$

Nollaverkon impedanssi saadaan vastaavalla tavalla

$$Z_0 = \frac{J_{m_0} \cdot Gen_0}{J_{m_0} + Gen_0} + Runko_0$$

Komponenttiverkko kytkeytyy sarjaan, jolloin myötä-, vasta- ja nollaverkossa kulkee sama virta $I = I_1 = I_2 = I_0$. Oletetaan vikaimpedanssi nolaksi $Z_f = 0$. Vikaimpedanssi, kuten muutkin suureet, jotka esiintyvät tähtipisteen ja nollan välillä, tulevat kolminkertaisina. (Pyrhönen & Missaghi 1983)

$$I = \frac{U_v}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \cdot Z_f}$$

Vikapaikan virta on $I_f = 3 \cdot I$. Jotta tiedetään sulakkeen läpi menevän virran osuus, täytyy selvittää virran jakautuminen jakelumuuntaja- ja tuotantolaitoshäärän kesken. Virta jakaantuu haarojen impedanssien suhteessa. Jakelumuuntajan kautta kulkevat komponenttivirrat saadaan

$$I_{jm1} = I_{jm2} = \frac{\text{Gen}}{\text{Gen} + \text{Jm}} \cdot I$$

$$I_{jm0} = \frac{\text{Gen}_0}{\text{Gen}_0 + \text{Jm}_0} \cdot I$$

Komponenttisuureista päästään vaihesuureisiin vaiheenkääntöoperaattorin a avulla seuraavasti (Pyrhönen & Missaghi 1983)

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{jm0} \\ I_{jm1} \\ I_{jm2} \end{bmatrix}, \text{ missä } a = e^{\frac{2\pi_i}{3}}.$$

Vastaavalla tavalla voidaan jakaa komponenttivirta tuotantolaitoksen kautta kulkevaan osuuteen ja laskea vaihesuureet yllä olevan matriisin ja vaiheenkääntöoperaattorin avulla, jolloin tiedetään tuotantolaitoksen syöttämä vikavirta

PIENTUOTANNON TILANNE SUOMESSA

